



**Escola Politècnica Superior
d'Enginyeria de Vilanova i la Geltrú**

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

TRABAJO FINAL DE MÀSTER

TITULO: Corrección de los efectos de las derivas de reloj en microrredes de alterna con inversores de potencia trifásicos

AUTOR: ALFARO ARAGÓN, CARLOS ARTURO

FECHA DE LA PRESENTACIÓN: Febrero, 2018

APELLIDOS: Alfaro Aragón

NOMBRES: Carlos Arturo

TITULACIÓN: MÁSTER UNIVERSITARIO EN INGENIERÍA DE SISTEMAS AUTOMÁTICOS Y ELECTRÓNICA INDUSTRIAL

PLAN: 2012

DIRECTOR: Miguel Castilla Fernández

DEPARTAMENTO: Ingeniería Electrónica

QUALIFICACIÓ DEL TFM

TRIBUNAL

PRESIDENT

SECRETARI

VOCAL

DATA DE LECTURA:

Aquest Projecte té en compte aspectes mediambientals: ☐ Sí ☐ No

RESUMEN

En las microrredes que trabajan con inversores sus controles son operados generalmente por microcontroladores locales, los cuales tienen sus propios relojes que difieren entre cada uno en la medición del tiempo. Los microcontroladores tienen derivas de tiempo con respecto a los demás, afectando así a las señales de reloj que son utilizadas para controlar sistemas en tiempo real. Estas desviaciones en el tiempo de cada microcontrolador son llamadas derivas de reloj.

Las derivas de reloj tienen un efecto negativo en el control de los inversores de las microrredes cuando estas tratan de compensar los errores en estado estacionario en frecuencia que genera el método de Droop. Estas derivas afectan a la compartición de potencia de los inversores, lo cual repercute en los inversores, pudiendo generar más estrés y sobrecalentamiento en algunos de ellos. Es por ello por lo que este trabajo tiene como objetivo principal compensar estos efectos negativos proponiendo 3 esquemas de control que sean capaz de corregir los efectos de las derivas de reloj.

El trabajo incluye el análisis descriptivo de las tres propuestas y además resultados de simulación de la implementación de los tres esquemas de control en una microrred modelada en MATLAB-SIMULINK y TrueTime.

Palabras Claves:

Microrred	Derivas de reloj	Control	Compartición de potencia
Regulación de frecuencia	Inversores		

ABSTRACT

In inverter-based microgrids, their controls are usually operated by local microcontrollers, usually with their own clocks that differ among each other in the measurement of time. The microcontrollers have drifts of time with respect to the others, thus affecting the clock signals which are used to control systems in real time. These deviations in time of each microcontroller are called clock drifts.

Clock drifts have a negative effect on the inverters control of the microgrids when they try to compensate the errors in steady state in frequency generated by the Droop method. Thus, affecting the power sharing of the inverters, which impacts in the inverter, being able to generate more stress and overheating in some of them. That is why this work has as main objective to compensate for these negative effects by proposing 3 control schemes that improve the effects of clock drifts.

The work includes the descriptive analysis of three proposals control and simulation results of the implementation of the three control schemes in a microgrid modeled in MATLAB-SIMULINK and TrueTime.

Keywords:

Microgrid	Clock drift	Control	Power sharing
Frequency regulation	Inverter		

INDICE

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 VISIÓN GENERAL DEL PROYECTO	8
1.2 MOTIVACIÓN	8
1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO.....	9
1.4 ALCANCE DEL PROYECTO	9
2. MICRORREDES	11
2.1 DEFINICIÓN DE LA MICRORRED	11
2.2 ARQUITECTURA DE LAS MICRORREDES.....	13
2.2.1 GENERADORES DISTRIBUIDOS.....	14
2.2.2 DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO.....	15
2.2.3 CARGAS.....	15
2.2.4 OTROS ELEMENTOS	16
2.3 MÉTODOS DE OPERACIÓN DE UNA MICRORRED	16
2.3.1 MODO DE OPERACIÓN CONECTADO A LA RED	17
2.3.2 MODO DE OPERACIÓN ISLA.....	17
2.4 GESTIÓN DE LAS MICRORREDES	18
2.4.1 CONTROL TERCIARIO.....	19
3. CONTROL DE MICRORREDES	21
3.1 CONTROL JERÁRQUICO.....	21
3.1.1 CONTROL PRIMARIO: DROOP CONTROL.....	21
3.1.2 IMPEDANCIA VIRTUAL.....	24

3.1.3	CONTROL SECUNDARIO LOCAL: DLPF	25
3.1.4	LAZO DE VOLTAJE.....	26
3.1.5	LAZO DE CORRIENTE	27
3.2	CONTROL IMPLEMENTADO EN CASO DE ESTUDIO	28
4.	PROPUESTAS DE CONTROL.....	29
4.1	EFFECTOS DE LAS DERIVAS DE RELOJ	29
4.2	PROPUESTA DE CONTROL 1: LAZO DE POTENCIA COMO TERCER TÉRMINO DEL MÉTODO DROOP.....	30
4.3	PROPUESTA DE CONTROL 2: MODIFICACIÓN DE LA PENDIENTE M POR MEDIO DE UN LAZO DE POTENCIA.....	31
4.4	PROPUESTA DE CONTROL 3: MODIFICACIÓN DE LA REFERENCIA DE FRECUENCIA DEL CONTROL SECUNDARIO POR MEDIO DE UN LAZO DE POTENCIA.....	33
5.	SIMULACIÓN Y RESULTADOS.....	35
5.1	SIMULACIÓN DE LA MICRORRED SIN LAS DERIVAS DE RELOJ.....	39
5.2	SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS DERIVAS DE RELOJ.....	43
5.3	SIMULACIÓN DE LA PROPUESTA DE CONTROL 1	47
5.4	SIMULACIÓN DE LA PROPUESTA DE CONTROL 2	51
5.5	SIMULACIÓN DE LA PROPUESTA DE CONTROL 3	55
5.6	ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	59
6.	CONCLUSIONES.....	60
	BIBLIOGRAFIA	61

INDICE DE TABLAS Y FIGURAS

FIGURA 1: ARQUITECTURA DE UNA MICRORRED [7]	14
FIGURA 2: REPRESENTACIÓN DEL CONTROL JERÁRQUICO	19
FIGURA 3: GRÁFICA DEL MÉTODO DROOP	22
FIGURA 4: DIAGRAMA DE CONTROL DEL MÉTODO DROOP	23
FIGURA 5: ESQUEMA DE DOS VSI EN PARALELO CON IMPEDANCIAS VIRTUALES.	24
FIGURA 6: GRÁFICA DEL MÉTODO DROOP CON INFLUENCIAS DEL CONTROL SECUNDARIO	25
FIGURA 7: DIAGRAMA DEL CONTROL SECUNDARIO DLPF	26
FIGURA 8: DIAGRAMA DE CONTROL DE LAZO DE VOLTAJE	27
FIGURA 9: DIAGRAMA DE CONTROL DEL LAZO DE CORRIENTE	27
FIGURA 10: DIAGRAMA DE CONTROL DE LA MICRORRED MODELADA	28
FIGURA 11: EFECTO DE LA PROPUESTA DE CONTROL 1 SOBRE LA ECUACIÓN DEL DROOP	31
FIGURA 12: EFECTOS DE LA PROPUESTA DE CONTROL 2 SOBRE LA ECUACIÓN DEL DROOP	33
FIGURA 13: MODELO DE LA MICRORRED SIMULADA	35
TABLA 1: PARÁMETROS DE LA MICRORRED MODELADA	36
TABLA 2: CONSTANTES DEL CONTROL PRIMARIO Y SECUNDARIO	36
FIGURA 14: CONFIGURACIÓN DE LA SIMULACIÓN	37
TABLA 3: DERIVAS DE RELOJ DE LOS MICRO CONTROLADORES	37
TABLA 4: VALORES DE KPOT	38
FIGURA 15: GRÁFICA DE POTENCIAS SIN DERIVAS DE RELOJ	39
FIGURA 16: GRÁFICAS DE FRECUENCIAS SIN DERIVAS DE RELOJ	40
FIGURA 17: ERROR EN COMPARTICIÓN DE POTENCIA SIN DERIVAS DE RELOJ	41
FIGURA 18: ERROR EN FRECUENCIA SIN DERIVAS DE RELOJ	42
FIGURA 19: GRÁFICA DE POTENCIAS CON DERIVAS DE RELOJ	43
FIGURA 20: GRÁFICAS DE FRECUENCIAS CON DERIVAS RELOJ	44
FIGURA 21: ERROR EN COMPARTICIÓN DE POTENCIAS CON DERIVAS DE RELOJ	45
FIGURA 22: ERROR EN FRECUENCIAS CON DERIVAS DE RELOJ	46
FIGURA 23: GRÁFICAS DE POTENCIAS DE LA PROPUESTA 1	47
FIGURA 24: GRÁFICA DE FRECUENCIAS DE LA PROPUESTA 1	48
FIGURA 25: ERROR EN COMPARTICIÓN DE POTENCIAS DE LA PROPUESTA 1	49
FIGURA 26: ERROR EN FRECUENCIA DE LA PROPUESTA 1	50
FIGURA 27: GRÁFICA DE POTENCIAS DE LA PROPUESTA 2	51
FIGURA 28: GRÁFICA DE FRECUENCIAS DE LA PROPUESTA 2	52
FIGURA 29: ERROR EN COMPARTICIÓN DE POTENCIA DE LA PROPUESTA 2	53
FIGURA 30: ERROR EN FRECUENCIA DE LA PROPUESTA 2	54
FIGURA 31: GRÁFICA DE POTENCIAS DE LA PROPUESTA 3	55
FIGURA 32: GRÁFICA DE FRECUENCIAS DE LA PROPUESTA 3	56
FIGURA 33: ERROR EN COMPARTICIÓN DE POTENCIA DE LA PROPUESTA 3	57
FIGURA 34: ERROR EN FRECUENCIA DE LA PROPUESTA 3	58
TABLA 5: RESUMEN DE RESULTADOS	59

GLOSARIO

DLPF: Distributed low-pass filters

DOE: Departamento de energía de los Estados Unidos

IEA: Internation Energy Agency

MC: Control local de la microrred

MGCC: Control central de la microrred

PCC: Punto común de acoplamiento

P-RES: Proporcional Resonante

SVM: Space Vector Modulator

VSI: Voltage Source Inverter

1. INTRODUCCIÓN

1.1 VISIÓN GENERAL DEL PROYECTO

Actualmente con el incremento de la demanda eléctrica, las políticas y tratados por generar energía de manera más limpia para la reducción de las emisiones de CO₂, y los intereses en las propuestas en eficiencia energética, con el fin de reducir costes, ha provocado un auge de promover e implementar cada vez más las energías renovables. De esta manera se ha aumentado los puntos de generación de energía y se ha hecho cada vez más fuerte el concepto de generación distribuida. Surgen así en los últimos años conceptos como las microrredes y nuevos modelos en la red eléctrica.

La generación distribuida, y las microrredes, como todo, tiene sus ventajas, tales como, reducir las pérdidas por transporte de la energía, mayor calidad en el suministro eléctrico, una mayor tolerancia a fallos, entre otras. Teniendo así también desventajas, principalmente en los costes de gestión y falta de normativas que permitan una integración a la red eléctrica de manera estandarizada [1]. Es por ello por lo que se tiene la necesidad de crear e implementar soluciones que brinden la mayor calidad posible en el suministro eléctrico y una óptima integración de la microrred a la red eléctrica.

Es a partir de esto que se realizan investigaciones que permitan crear estrategias de control y gestión de las microrredes, para un mejor desarrollo de estas tecnologías permitiendo así la implementación de estas de manera óptima. Teniendo así distintas estrategias de control que permiten que las microrredes funcionen de la forma deseada.

Así para una microrred trifásica de alterna, que es el caso de estudio de este proyecto, en la interconexión entre los distintos suministros de energía se tienen inversores trifásicos los cuales trabajan como fuentes de voltaje en paralelo, VSI por sus siglas en inglés (Voltage-Source Inverters). Inversores los cuales, para este caso de estudio, trabajan en compartición de potencia con el método de control “droop”, que permite trabajar a cada inversor de manera autónoma sin comunicaciones logrando de manera eficaz la compartición de potencia entre los inversores. Además, utilizando un control secundario local basado en filtros de paso bajo distribuido, “distributed low-pass filters” (DLPF), que tiene como objetivo reducir el error en frecuencia de los inversores.

1.2 MOTIVACIÓN

A partir de la necesidad de implementar soluciones que permitan brindar una mayor calidad e integración del suministro eléctrico de una microrred. Y partiendo de previas investigaciones de los impactos de las derivas del reloj de los microcontroladores en las microrredes, trabajando en compartición de potencia y utilizando un control secundario local DLPF presentados en [2]. Se tiene la motivación de realizar este proyecto, que busca la implementación de nuevas estrategias de control que permitan mitigar los

efectos causados por las derivas de reloj de los microcontroladores.

Así entonces en este proyecto se presentan tres propuestas de control que permitan mitigar los efectos de las derivas de reloj. Y por consecuencia reducir el error en compartición de potencia causado por dichas derivas. Logrando así obtener una mejor calidad en el suministro eléctrico de la microrred y poder repartir el trabajo a todos los inversores evitando estrés y sobrecalentamientos en estos.

1.3 OBJETIVOS DEL PROYECTO

El objetivo principal del proyecto es la corrección de los efectos negativos de las derivas de reloj de los microcontroladores sobre las microrredes con inversores trabajando como fuente de voltaje.

Dicho objetivo principal conlleva distintos objetivos secundarios, como es el brindar una mejor calidad en el suministro eléctrico de las microrredes, dando así mejores prestaciones de estas. Además, se pretende proveer soluciones que permitan una fácil implementación.

Para ello en este proyecto se presenta una breve descripción de las microrredes, sus definiciones y arquitectura. También se muestran los distintas estrategias y lazos de control de las microrredes usadas para este caso de estudio. Además, se definen los efectos causados por las derivas de reloj en la compartición de potencia de los inversores.

Para lograr el objetivo de corregir los efectos de las derivas de reloj se plantean distintas estrategias de control, teniendo en común un mismo objetivo de control que es reducir el error en la compartición de potencia. Dichas estrategias pretenden atacar puntos claves del droop control y el control secundario, que permiten hacer ligeras modificaciones en las frecuencias relativas de cada inversor.

1.4 ALCANCE DEL PROYECTO

Para lograr los objetivos indicados en el apartado anterior este trabajo presentará un estudio con las descripciones de lo que es una microrred, de como esta se compone y las estrategias y métodos de control que permiten su funcionamiento.

Además, se presentan los impactos que tienen las derivas de reloj en las microrredes y sus descripciones matemáticas presentados en [2].

Como punto principal del proyecto se plantearán 3 estrategias de control que permitan corregir los efectos negativos de las derivas de reloj. Dichas estrategias serán descritas y desarrolladas matemáticamente de forma teórica.

Por último, como parte práctica se realizaron simulaciones de una microrred por medio de “Matlab-Simulink” utilizando la herramienta de “trueTime” para simular el

comportamiento de un microcontrolador. De esta manera se busca simular las derivas de reloj de cada uno de los microcontroladores de cada inversor.

Las simulaciones se realizaron con la configuración eléctrica de Norteamérica, operando a una frecuencia nominal 60Hz y una tensión de 110Vrms, con cargas únicamente resistivas.

En este trabajo se presentan los resultados de simulación tanto de los efectos de las derivas de reloj en la microrred. Así como los resultados de cada una de las estrategias de control planteados para corregir estos efectos.

2. MICRORREDES

Este capítulo presenta nociones de lo que es una microrred, sus definiciones y arquitectura; así como también estrategias de gestión de las microrredes.

2.1 DEFINICIÓN DE LA MICRORRED

Como es sabido, en los últimos años se ha tenido un incremento en la creación de nuevos puntos de generación de energía, dando un auge al concepto de generación distribuida. La cual, según IEA, por sus siglas en inglés (International Energy Agency), la define como

“La generación distribuida son plantas de energía sirviendo al consumidor en sitio o proveyendo soporte a la red de distribución conectada a la red a los niveles de voltaje de distribución. Las tecnologías generalmente incluidas son motores, pequeñas (incluso micro) turbinas, pilas de combustible y energía fotovoltaicas. La energía eólica no es incluida generalmente ya que la mayor parte de generación eólica tiene como propósito suministrar energía requerida en sitio” [3].

Según la IEEE 1547 “Series of Standards: Interconnection Issues” [4], una red de generación distribuida no debe sobrepasar la generación de 10 MVA.

Pero la generación distribuida tiene ciertos aspectos importantes que deben ser considerados, ya que pueden ser negativos para la red. Como es el caso de la calidad de la energía eléctrica que cada uno de los distintos puntos de generación brindan a la red. Y es que si no se tiene control de esto puede perjudicar la calidad de energía suministrada por toda la red. Y es a partir de esto que en los últimos años ha surgido el concepto microrredes, las cuales se pueden definir, según proyectos de investigación en Estados Unidos, de la siguiente manera:

“Las microrredes son comprendidas por sistemas de distribución de bajo voltaje con fuentes de energía distribuida, como microturbinas, pilas de combustible, paneles fotovoltaicos, etc.; junto con dispositivos de almacenamiento, como “Flywheels”, capacitores y baterías; y cargas controlables, que se comportan como una entidad coordinada, ofreciendo así capacidades de control considerables sobre la operación de la red. Estos sistemas están interconectados a media tensión con la red de distribución, pero también se pueden operar aislados de la red principal en caso de fallas de la red. Por tanto, la microrred puede dar soporte de red en momentos de estrés aliviando las congestiones y ayudar a la restauración después de las fallas. Desde el punto de vista del cliente, las microrredes proporcionan las necesidades térmicas y eléctricas; y, además mejora la confiabilidad, reduce las emisiones, mejora la calidad de energía y reduce las caídas de voltaje” [5].

Otra definición de microrredes brindada por un grupo de investigadores del DOE (Departamento de energía de los Estados Unidos), es:

“Una microrred es un grupo de cargas interconectadas y recursos de energía distribuidos dentro de límites eléctricos claramente definidos, que actúa como una entidad única controlable con respecto a la red. Una microrred puede conectarse y desconectarse de la red para permitirle operar tanto en modo conectado a la red como en modo isla” [6].

Las microrredes en los últimos años han ido ganando mucho apogeo en el campo de la investigación. Teniendo así varios campos y centros de investigación que tienen implementadas microrredes, que permiten investigar y crear estrategias tanto de la gestión general de las microrredes y como estas interactúan con las cargas y la red. Investigando también el control interno de los inversores y las distintas estrategias de control que permiten una mayor calidad en el suministro de energía.

Es importante mencionar que el desarrollo de las microrredes está encaminada a ser una tecnología muy utilizada en el futuro y que tiene sus ventajas sobre la red convencional, de las cuales se pueden mencionar:

- Disminuyen las pérdidas por distribución de energía dado que el consumo energético es cercano a las microrredes, aportando así a la eficiencia energética.
- Brindan una mayor calidad en el suministro de energía.
- Disminuyen la dependencia de la red de distribución, pudiendo trabajar hasta sin ella en modo aislado completamente independiente.
- Al trabajar en modo isla la red se hace más tolerante a fallos, ya que en caso de una caída de la red o una completa desconexión la microrred es capaz de proveer energía a las cargas más críticas, siendo así una buena solución para ciudades o países que son afectados por seguidos desastres naturales.
- Permite llevar energía eléctrica a lugares que la red principal no puede llegar.

También se pueden mencionar ciertas desventajas que estas aún tienen sobre la red convencional, tales como:

- Puede conllevar altos costes de instalación y mantenimiento.
- Requiere de controles complejos para brindar la calidad de energía deseada, y aun no se cuenta con estándares que regulen esta calidad en microrredes.
- La sincronización con la red requiere de controles complejos, donde un fallo en esto puede perjudicar la red de distribución y viceversa.

Pero es importante resaltar que la apuesta por las microrredes en el futuro es muy alta, ya que puede brindar soluciones a problemas energéticos que la red convencional no es capaz de solventar.

2.2 ARQUITECTURA DE LAS MICRORREDES

A partir de las definiciones de microrred y generación distribuida ya planteadas nos podemos hacer una idea de cómo es la arquitectura básica de una microrred. Teniendo en cuenta que será indispensable que esta sea conformada por fuentes de generación de energía, ya sean renovables o convencionales; dispositivos de almacenamiento de energía, como baterías; y cargas controlables.

Además de estos se sabe que la microrred puede trabajar junto a la red principal, por lo tanto, ambas deben estar interconectadas por un punto común de acoplamiento, o PCC por sus siglas en inglés. Por lo cual se debe contar con subestaciones que permitan pasar de medios voltajes a bajos voltajes, y viceversa, para el acoplamiento entre la red de distribución y la microrred. También se debe considerar que para la interconexión de todos los elementos en una sola red será necesario de dispositivos electrónicos que permitan acoplar todas las tecnologías. Por lo que una microrred deberá contar con convertidores e inversores, todos correctamente controlados para no tener problemas en la red y la calidad de energía suministrada.

Por último, la microrred para su funcionamiento debe contar con distintos niveles de control, que son el control de la microrred central (MGCC), los controles locales de la microrred (MC) y el control de las cargas (LC), los cuales se detallan más adelante.

En distintas literaturas se pueden obtener diferentes modelos y arquitecturas de las microrredes, difiriendo cada uno en aspectos muy pequeños. En la figura 1 se muestra una propuesta de arquitectura de una microrred propuesta por Peças Lopes [7].

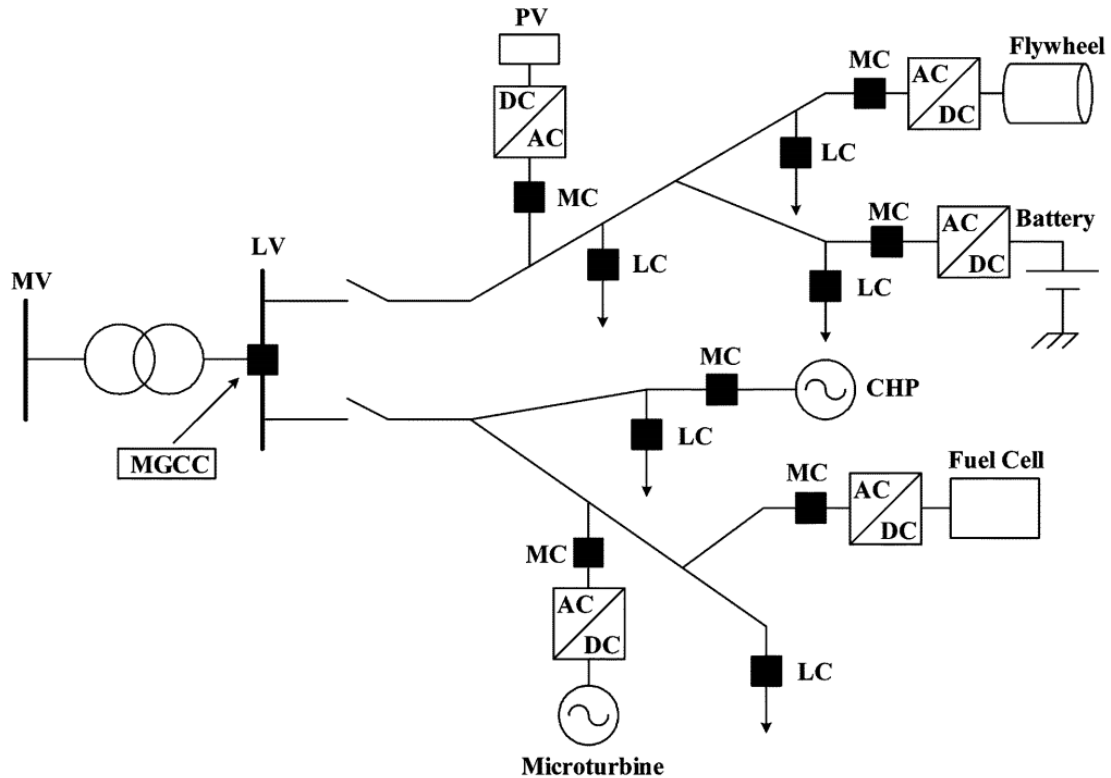


Figura 1: Arquitectura de una microrred [7]

Los elementos que componen una microrred son los explicados a continuación [8].

2.2.1 GENERADORES DISTRIBUIDOS

Estos son una parte esencial de la microrred ya que son las fuentes de energía de la microrred, permitiéndole trabajar de manera aislada y autónomo de la red principal.

Los generadores distribuidos son distintas fuentes de energía que pueden ser renovables o convencionales, como, por ejemplo:

- Motores.
- Pequeñas y micro turbinas.
- Pilas de combustible.
- Paneles fotovoltaicos.
- Fuentes eólicas.

Los generadores distribuidos requieren de inversores para su funcionamiento, y estos pueden trabajar como fuentes de corriente o fuentes de voltaje.

Estas fuentes de energía se pueden clasificar entre intermitentes y continuas. Siendo las intermitentes aquellas fuentes cuya variación es incierta y por tanto no se puede tener control completo de su generación, como es el caso de los paneles fotovoltaicos o fuentes eólicas, donde depende de condiciones medioambientales para su generación, estas fuentes suelen trabajar como fuentes de corriente. Las otras fuentes si se puede tener un control sobre su generación lo que permite que sean fuentes que pueden trabajar como fuentes de voltaje en microrredes funcionando en modo aislado de la red.

2.2.2 DISPOSITIVOS DE ALMACENAMIENTO

Podría decirse que junto a los generadores distribuidos estos son la parte principal de una microrred. Ya que permiten que esta puede ser autónoma a la red en momentos necesarios sin depender de otros recursos, por un tiempo limitado a la carga almacenada. Estos dispositivos pueden tanto brindar energía a las cargas como recibir energía ya sea de la red o de otras fuentes de energía, como por ejemplo paneles fotovoltaicos.

Estos dispositivos están conectados a la red mediante inversores, en el caso de una red trifásica, que generalmente trabajaran como fuentes de voltaje (VSI).

Entre los dispositivos de almacenamiento utilizados están:

- Baterías
- Flywheels
- Condensadores

Cada uno brindando distintas ventajas siendo unos mejor que otros en función de sus necesidades.

2.2.3 CARGAS

Son las cargas que deberá alimentar la microrred, estas pueden ser controlables o no. En caso de trabajar en modo aislado las cargas pueden tener prioridades, donde las más críticas tendrán suministro continuo de energía y las menos críticas podrían ser apagadas.

La microrred debe ser capaz de soportar cambios de cargas bruscos y gestionar los distintos elementos para obtener una mayor eficiencia energética.

2.2.4 OTROS ELEMENTOS

Otros elementos que forman una microrred son elementos que permiten interconexión y regulaciones del sistema, como controles e interruptores.

Algunos de estos elementos son:

- Subestación que permita transformar líneas de bajo voltaje, utilizados en las cargas, a líneas de medio voltaje, utilizados en la red de distribución
- Un punto común de acoplamiento que una la microrred con la red principal, este a su vez debe contar con las debidas protecciones e interruptores que permitan a la microrred estar conectada o no a la red.
- Un controlador global que gestione las cargas controlables, los generadores distribuidos y los dispositivos de almacenamiento; y que también gestione la decisión de conectarse o no la red.
- Convertidores e inversores con sus respectivos controles locales que conectan los generadores distribuidos y dispositivos de almacenamiento con las cargas.

2.3 MÉTODOS DE OPERACIÓN DE UNA MICRORRED

Una microrred, como ya se dijo, se encuentra conectada a la red principal por medio del PCC, haciendo que toda la microrred sea un solo punto para la red, ya sea de generación, si este tiene un exceso de generación y suministra energía a la red; o como una carga más de la red, en el caso que la microrred requiera abastecerse de la energía de la red.

Pero por medio del PCC también ocurre otra tarea importante que debe ser gestionada. Y es la desconexión y conexión de la microrred con la red principal. Permitiendo así que la microrred pueda trabajar ya sea conectada a la red o desconectada de esta, aislada de la red, conocido como trabajar en modo isla. Por lo que una microrred tiene dos modos de funcionamiento y cada uno harán que esta se gestione de maneras distintas.

2.3.1 MODO DE OPERACIÓN CONECTADO A LA RED

La microrred como ya se mencionó se encuentra conectada a la red mediante el PCC y puede trabajar de manera conjunta para satisfacer las cargas del sistema.

En este modo la microrred no solo es capaz de brindar energía a las cargas, sino que también tiene la posibilidad de exportar la energía de la red. Caso que es más común por medio de fuentes de energía renovables como paneles fotovoltaicos y generadores eólicos, que como su generación no es completamente controlada pueden tener excesos donde las microrredes brindan energía a la red, o bien esta energía extra sirva para cargar los dispositivos de almacenamiento. También puede darse el caso que las fuentes de energía continua realicen estas tareas.

Para hacer una buena gestión de la energía el control central deberá de monitorizar en todo momento como se encuentra la red y hacer una gestión de energía que permita el control de los convertidores en función del flujo de energía, para así ser capaz de importar o exportar energía de la red o hacia la red controlando las potencias activas y reactivas [9].

En este modo, dado que se utiliza la red como principal fuente de voltaje, es común que las fuentes de energía trabajen con sus inversores como fuentes de corriente, ya que esto permite que la sincronización con la red sea más fácil y no haya problemas con la calidad de la energía.

2.3.2 MODO DE OPERACIÓN ISLA

Una microrred puede trabajar de forma autónoma y desconectada de la red, a este modo de funcionamiento se le llama modo isla. Una microrred puede trabajar en modo isla en dos casos [9]:

- Modo isla planeada: En este caso la microrred se ha preparado para entrar en modo isla, esto puede ser por bajas previstas en la red, por bajas de voltaje frecuentes en la red u otras causas previsibles.
- Modo isla no planeada: En este caso la microrred debe entrar en modo isla sin previo aviso, esto es frecuente en apagones de la red principal. Para esto la microrred debe ser capaz de detectar estos fallos de la manera más rápida posible.

Uno de los aspectos más importantes a tener en cuenta en el modo isla es que la microrred es la responsable de suministrar la calidad de energía, controlando así los voltajes y frecuencias de la red. Para esto se necesita tener al menos un inversor funcionando como fuente de voltaje que funcione como maestro y suministre la calidad de la energía. Por esto la microrred debe ser capaz de gestionar el voltaje y la corriente de la red; balancear la producción y demanda y brindar energía de calidad, tanto

compensando energía reactiva como armónicos de corriente [9].

Por último, la microrred debe ser capaz realizar todas estas tareas de manera síncrona a lo que sucede en la red. Por lo que debe estar monitoreando en todo momento tanto el estado de la red principal como la microrred. También es importante para la microrred poder sincronizarse con la red principal para su reconexión, para ello la microrred debe estar sincronizada tanto en frecuencia como en fase con la red para su conexión. Para ello se hace uso de algoritmos de control que permiten el seguimiento de fase y frecuencias de la red, esto también se aplica para todas aquellas fuentes nuevas que se integran a la microrred en determinado momento.

2.4 GESTIÓN DE LAS MICRORREDES

Para que una microrred logre trabajar de manera óptima esta necesita de ciertas estrategias de control y gestión que permiten brindar la mejor calidad de energía dando respuesta en tiempo real a todas las necesidades de la microrred.

Para ello las microrredes cuentan con un control central que permite la gestión de energía y funcionamiento. Además, las microrredes son controladas de manera jerárquica, teniendo 3 niveles de control, tal como se muestra en la figura 2, los cuales son [9]:

- Control Primario: Control usado para regular potencias, voltaje, frecuencias y corrientes de los inversores.
- Control Secundario: Control usado para corregir error en estado estacionario del control primario
- Control Terciario: Control usado para una gestión global de la energía.

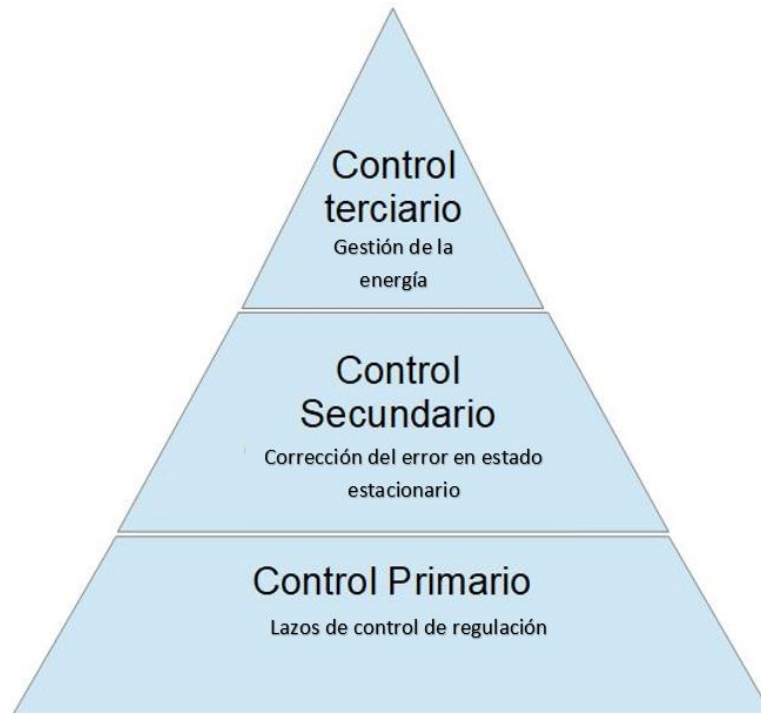


Figura 2: Representación del control jerárquico

En este apartado detallaremos el tercer nivel de control que es el que compete a la gestión de las microrredes. Y más adelante en este trabajo se detallarán más en profundidad el nivel primario y secundario, los cuales fueron utilizados para el control de la microrred modelada y simulada.

2.4.1 CONTROL TERCIARIO

Este nivel de control se encarga de mejorar y optimizar los flujos de energía de los inversores, ajustando los flujos de manera global para que estos sean capaces de importar o exportar energía según sea lo necesario. Por lo que el control debe ser capaz de gestionar la energía de manera óptima para lograr el mayor aprovechamiento de esta.

El control deberá de monitorizar todos los parámetros de la red, así como también las cargas que se encuentran conectadas, para así gestionar las fuentes de energía de la microrred. De esta manera manda consignas de potencias ya sean positivas o negativas para que estos sean capaces de inyectar o recibir potencia. Este control también debe gestionar la calidad de la energía, reduciendo así armónicos y otras imperfecciones en el suministro [9].

Para lograr una buena gestión de la energía la microrred debe de realizar un balance de energía, en donde intervienen todos los elementos de la microrred y la red principal, tal como muestra la ecuación 1.

$$\sum P_L - \sum P_{GD} - \sum P_{DA} = P_{red} \quad \text{Ec. 1}$$

Donde:

- P_L =Potencia de las cargas.
- P_{GD} =Potencia de los Generadores distribuidos.
- P_{DA} =Potencia de los dispositivos de almacenaje.
- P_{red} =Potencia de la red.

Gestionando así las potencias inyectadas o absorbidas por cada inversor.

3. CONTROL DE MICRORREDES

En este capítulo se plantean los distintos lazos de control de una microrred trabajando en modo aislado con inversores trabajando en paralelo como fuente de voltaje que fueron utilizados en este trabajo para modelar y controlar la microrred.

3.1 CONTROL JERÁRQUICO

El control de las microrredes puede operar de manera jerárquica, como ya se mencionó anteriormente, teniendo tres niveles de control. Dichos niveles permiten el control y gestión de las microrredes. Este trabajo se centrará únicamente en los controles primarios y secundarios, los cuales serán detallados más adelante.

Este trabajo tiene como único punto de interés inversores trabajando como fuente de voltaje en paralelo VSI, y en modo isla, por lo que se detallarán también los lazos de voltaje y corriente, los cuales generan las señales para controlar los IGBTs de los inversores.

A continuación, se presentan los lazos de control de una microrred, cabe resaltar que no son las únicas estrategias de control, pero son las utilizadas en este caso de estudio.

3.1.1 CONTROL PRIMARIO: DROOP CONTROL

La función principal del control de los inversores es la inyección de potencia, tanto activa como reactiva, a la red, según las cargas lo requieran. Pero en el caso de una microrred trabajando en modo isla además se debe brindar calidad. Por lo que se necesita inversores trabajando como fuentes de voltaje, y con un control que no solo inyecte potencias, sino que también regule el voltaje y frecuencia suministrada.

Para lograr esto es necesario generar referencias de voltaje y frecuencias que puedan ser controladas. Pero además dado que las fuentes de voltaje pueden ser baterías u otras fuentes de energía que están conectadas a inversores, los cuales no cuentan con las características inerciales de un generador rotativo, haciéndolas más susceptibles a perturbaciones en la red.

Es por ello por lo que para lograr cumplir los objetivos de control y generar un control que brinde calidad en la energía y sea robusto antes perturbaciones en la red, surgen estrategias de control que brindan una inercia virtual a los inversores, siendo uno de estos el Droop control.

Este método consiste en reducir las referencias de voltaje y frecuencias en función de las potencias activas y reactivas [9]. Logrando así tener una máquina de inercia virtual que reaccione a las perturbaciones de las cargas. El esquema del Droop control es el mostrado en la figura 3, y es expresado de la siguiente manera.

$$\omega^* = \omega_o - m \times P \quad \text{Ec. 2}$$

$$E^* = E_o - n \times Q \quad \text{Ec. 3}$$

Donde E_o y ω_o son el voltaje nominal y frecuencia angular de referencia, n y m son las pendientes, las cuales deberán ser reguladas para un buen funcionamiento del control, P y Q son las potencias activas y reactivas previamente calculadas, y E^* y ω^* son la amplitud y frecuencia angular de referencia.

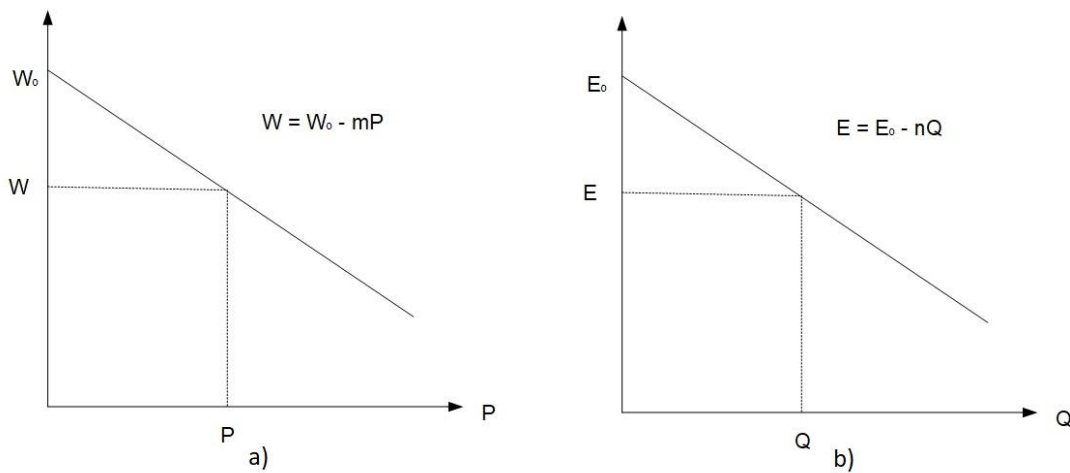


Figura 3: Gráfica del método Droop

Una vez obtenidas estas referencias de amplitud y frecuencias se construye la referencia de voltaje que luego será utilizada por un lazo de voltaje. El diagrama de control del método de Droop se presenta en la figura 4.

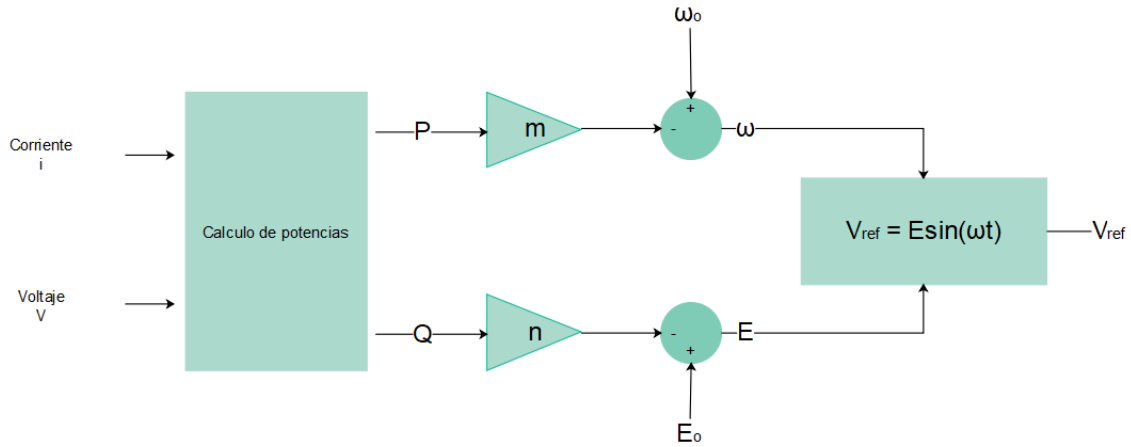


Figura 4: Diagrama de control del método Droop

El Droop control además de brindar las referencias de voltaje e inercia virtual a los inversores, dado que se trabajará con VSI trabajando en paralelo, permite a los inversores de trabajar en compartición de potencia. Lo cual es muy útil ya que de esta manera se evita el sobre esfuerzo de los inversores permitiendo que todos trabajen con la misma potencia.

Para ello se tiene como objetivo de control el presentado en la ecuación 4 definido a continuación:

$$P_i = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_j \quad \text{Ec. 4}$$

Donde P_j es la potencia de los inversores, y N es el número de inversores conectados.

Otra de las características más importantes del Droop control es que no necesita de comunicaciones. Por lo que puede trabajar con varios inversores conectados a la vez y funcionar perfectamente sincronizando todos los inversores a un mismo voltaje y frecuencia.

3.1.2 IMPEDANCIA VIRTUAL

Como es sabido para conectar fuentes de voltaje en paralelo se necesitará que ambas estén totalmente equilibradas, ya que la mínima diferencia de voltaje entre ambas generaría corrientes inducidas en los inversores.

Dado que el Droop control es un lazo de control con una respuesta transitoria lenta este necesita de otro control para lograr conectar dos o más VSI en paralelo. Para lograr esto se necesitaría físicamente impedancias variables que se ajusten a cada uno de los inversores para que puedan brindar el mismo voltaje a la carga. Ya que esto es caro, se utilizan impedancias virtuales, que emulan los efectos de las impedancias reales. Permitiendo así balancear los voltajes de los inversores y logrando trabajar con fuentes de voltaje en paralelo. En la figura 5 se muestra el esquema de dos VSI trabajando en paralelo con impedancias virtuales (Z_o).

Al implementar impedancias virtuales al voltaje de referencia obtenido por el Droop control se le resta un nuevo término tal como se muestra en la siguiente ecuación.

$$V_{ref} = E^* \times \sin(\omega^* t) - i \times Z_o \quad \text{Ec. 5}$$

Donde i y Z_o son la corriente del inversor y la impedancia virtual, respectivamente.

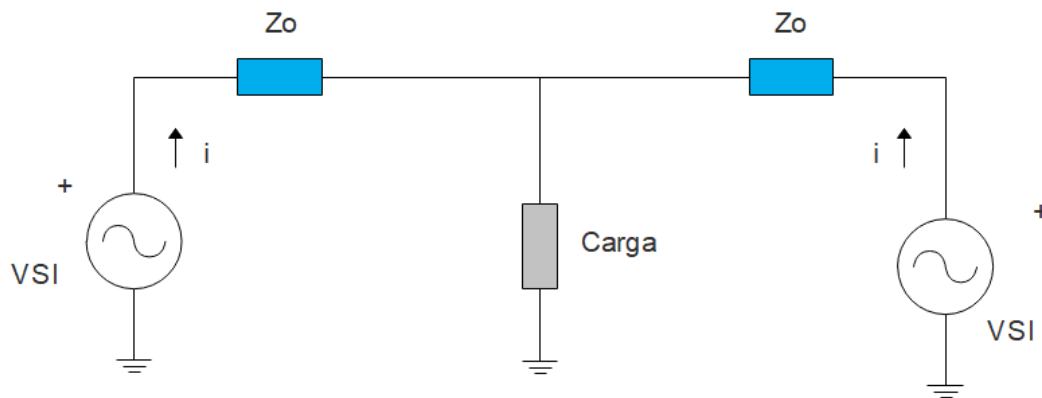


Figura 5: Esquema de dos VSI en paralelo con impedancias virtuales.

3.1.3 CONTROL SECUNDARIO LOCAL: DLPF

Para corregir los errores de frecuencia en estado estacionario que el control primario no puede corregir se utiliza un control secundario. El cual agrega un término más a la ecuación del droop, Re-expresando dicha ecuación de la siguiente manera:

$$\omega^* = \omega_o - m \times P + \delta \quad \text{Ec. 6}$$

Donde δ es el término del control secundario, en el cual pueden utilizarse distintos métodos de control, pero todos buscando el mismo objetivo de control, presentado en la ecuación 7. Este término modifica la ecuación de la recta generado por el Droop tal como se muestra en la figura 6, permitiendo que la frecuencia local se acerque cada vez a la frecuencia nominal querida.

$$\omega_{es} = \omega_o \quad \text{Ec. 7}$$

Donde ω_{es} es la frecuencia angular en estado estacionario y ω_o es la referencia.

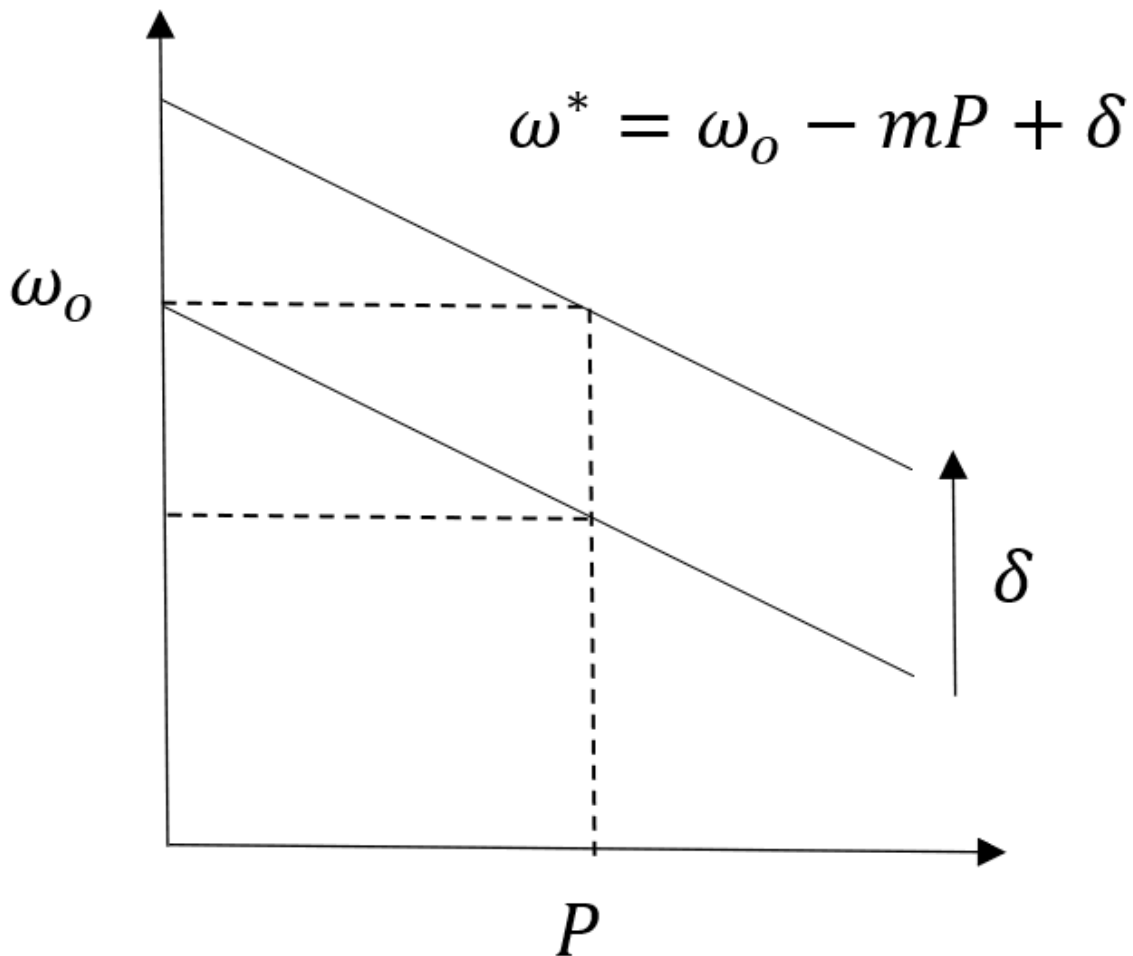


Figura 6: Gráfica del método droop con influencias del control secundario

Se debe tener en cuenta que el control secundario deber ser un control lento en comparación al control primario, para no intervenir en la dinámica de este, ya que esto podría causar inestabilidad en el sistema.

Para este caso de estudio el control secundario utilizado es el DLPF. La expresión del término δ es la presentada a continuación.

$$\delta = \omega_s \int (\alpha(\omega_o - \omega_i) - \delta) dt \quad \text{Ec. 8}$$

Donde ω_s y α son la frecuencia de corte y ganancia del filtro paso bajo; y ω_i es la frecuencia angular local. En la figura 7 se muestra el diagrama del control del DLPF.

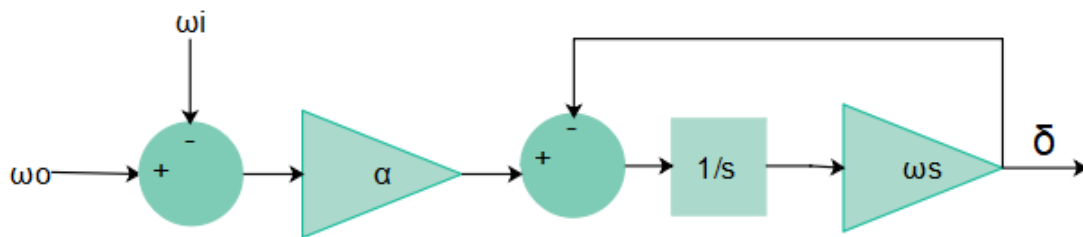


Figura 7: Diagrama del control secundario DLPF

3.1.4 LAZO DE VOLTAJE

Una vez obtenida la referencia de voltaje esta es utilizada por un lazo de voltaje que genera una referencia de corriente. Para ello el error de voltaje pasa por un control proporcional resonante (P-RES) el cual funciona como un filtro paso banda, que permite generar una referencia de corriente únicamente en la frecuencia central, que para este caso son 60 Hz.

El diagrama de bloques del lazo de voltaje es presentado en la figura 8, y su expresión matemática es la siguiente:

$$i_{ref} = (V_{ref} - V) \left(Kp + \frac{Ki \times 2 \times \xi \times \omega_o \times S}{S^2 + 2 \times \xi \times \omega_o \times S + \omega_o^2} \right) \quad \text{Ec. 9}$$

Donde Kp y Ki son las ganancias de los controladores, ω_o es la frecuencia de trabajo, la cual se quiere dejar pasar ubicando el centro de la campana de resonancia del filtro; ξ es un parámetro que permite el ensanchamiento de la campana de resonancia y S representa el operador de Laplace.

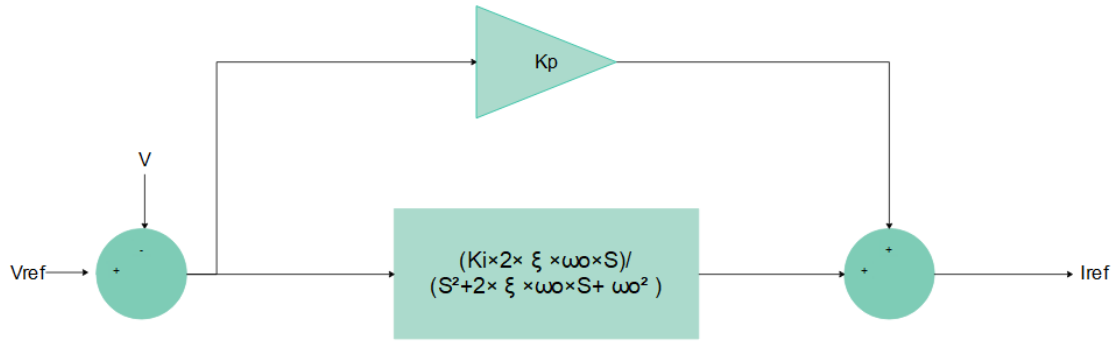


Figura 8: Diagrama de control de lazo de voltaje

3.1.5 LAZO DE CORRIENTE

Teniendo la referencia de corriente obtenida del lazo de voltaje esta es utilizada en un lazo de corriente que genera las referencias de conmutación del inversor. Este lazo al igual que el lazo de voltaje, utiliza un controlador P-RES por el cual pasa el error de corriente; adicional a esto se le adiciona un término feed-forward del voltaje, el cual proporciona aceleración al lazo de control.

El diagrama de bloques del lazo de corriente es presentado en la figura 9, y su expresión matemática es la siguiente:

$$D_{ref} = (i_{ref} - i) \left(Kp + \frac{Ki \times 2 \times \xi \times \omega_o \times S}{S^2 + 2 \times \xi \times \omega_o \times S + \omega_o^2} \right) + K \times V \quad \text{Ec. 10}$$

Donde Kp , Ki , ω_o , ξ y S cumplen las mismas funciones que en el lazo de voltaje, y K es una constante que acompaña al término feed-forward del voltaje.

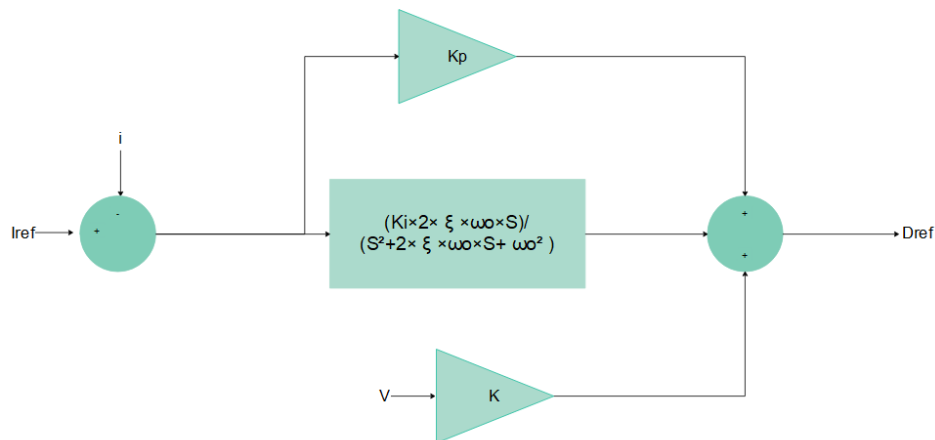


Figura 9: Diagrama de control del lazo de corriente

Estas referencias de conmutación generadas luego son utilizadas por un modulador de vector espacial, SVM por sus siglas en ingles “Space Vector Modulator”, el cual genera las señales PWM de conmutación del inversor necesarias para generar la potencia requerida.

3.2 CONTROL IMPLEMENTADO EN CASO DE ESTUDIO

Para el desarrollo del control de la microrred modelada y simulada en este trabajo se utilizaron los algoritmos de control antes mencionados. En la figura 10 se muestra el diagrama de control que fue implementado para este trabajo.

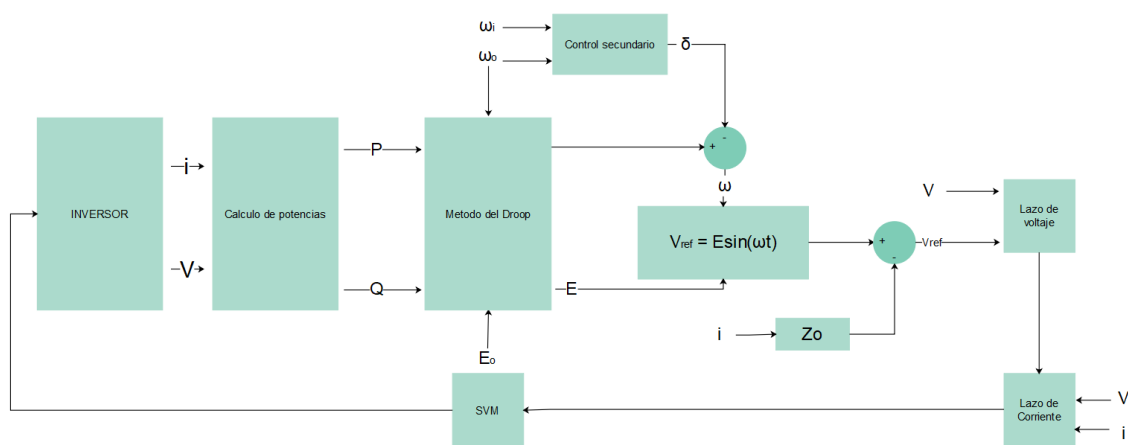


Figura 10: Diagrama de control de la microrred modelada

4. PROPUESTAS DE CONTROL

En este capítulo se plantearán las propuestas de control y el análisis de estas para corregir los efectos de las derivas de reloj en las microrredes.

4.1 EFECTOS DE LAS DERIVAS DE RELOJ

Como punto de partida se debe conocer lo que son las derivas de reloj en los osciladores electrónicos, y estas son producidas por efectos de temperatura y gravitatorio que afectan en la medida del tiempo de cada microcontrolador de manera local. Este efecto hace que los microcontroladores no vayan a la misma velocidad temporal entre ellos, haciendo diferir sus tiempos locales con respecto al de los demás microcontroladores y al tiempo global.

Matemáticamente se puede expresar el tiempo local de cada microcontrolador en función del tiempo global y las derivas de reloj de la siguiente manera

$$t_i = t(1 + d_i) \quad \text{Ec. 11}$$

Donde t_i es el tiempo local y d_i es la deriva o desviación del tiempo, la cual suele estar en el rango de los nanosegundos o menos.

Estos efectos de las derivas de reloj en las microrredes ya han sido estudiados anteriormente, por lo que es sabido que el control primario por el método de Droop por si solo es robusto a estas derivas [2]. Pero en investigaciones recientes se ha estudiado el impacto de estas en los controles utilizadas para compensar el error en estado estacionario de la frecuencia, en otras palabras, el control secundario, obteniendo resultados negativos en la compartición de potencia, objetivo de control del método Droop [2].

Este efecto se debe a que el control secundario busca corregir los errores en frecuencia haciendo uso de las frecuencias locales, tal como se muestra en la ecuación 8, esto causa que en estado estacionario las frecuencias se comporten de la siguiente manera.

$$(d_i + 1)\omega_{i,es}^* = \omega_{i,es} \quad \text{Ec. 12}$$

Donde $\omega_{i,es}$ es la frecuencia global en estado estacionario de cada inversor y $\omega_{i,es}^*$ es la frecuencia local de referencia. Pero además en sistemas de potencia la frecuencia es una variable global, por lo que $\omega_{i,es}$ tenderá a ω_{es} [2]

$$\omega_{i,es} = \omega_{es} \quad \text{Ec. 13}$$

Por lo que para que las frecuencias locales tiendan a este valor deberán ser compensadas por el control primario afectando así a la compartición de potencias.

Debido a estos efectos ocasionados por las derivas de reloj, en este trabajo se proponen 3 estrategias de control que permitan corregir estos efectos negativos. Para ello se propone un nuevo término φ_i que estará conformado por un lazo de control de potencias, el cual será utilizado para las tres propuestas.

$$\varphi_i = K_{pot} \int (P_{prom} - P_i) dt \quad \text{Ec. 14}$$

$$P_{prom} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_j \quad \text{Ec. 15}$$

Donde P_j son las potencias activas de cada uno de los inversores, la cual deberá ser comunicada a todos los inversores para la implementación del control.

El término propuesto es utilizado por cada uno de los controles para hacer modificaciones en los controles primario o secundario que permitan modificar las referencias de frecuencias locales de cada inversor afectadas por las derivas del reloj. De esta manera se busca compensar con este término las derivas de reloj modificando las referencias de frecuencias locales, las cuales a causa de estas derivas difieran de la frecuencia global.

A continuación, se presentan cada una de las propuestas.

4.2 PROPUESTA DE CONTROL 1: LAZO DE POTENCIA COMO TERCER TÉRMINO DEL MÉTODO DROOP

Como ya se mencionó antes el objetivo de este trabajo es la corrección de los efectos de las derivas de reloj en las microrredes. Para ello se han propuesto 3 controles, siendo el primer de ellos la adición de un tercer término, φ_i , a la ecuación del Droop. Buscando así con el nuevo término compensar la desviación de la frecuencia local con respecto a la global debido a las derivas de control.

La nueva ecuación del Droop con la adición de este término es la siguiente:

$$\omega^* = \omega_o - m \times P + \delta + \varphi \quad \text{Ec. 16}$$

Este término funciona igual que el control secundario, con la diferencia que busca compensar el error en estado estacionario de la compartición de potencias. De esta manera este control busca modificar la recta descrita en la ecuación del Droop tal como se muestra en la figura 11.

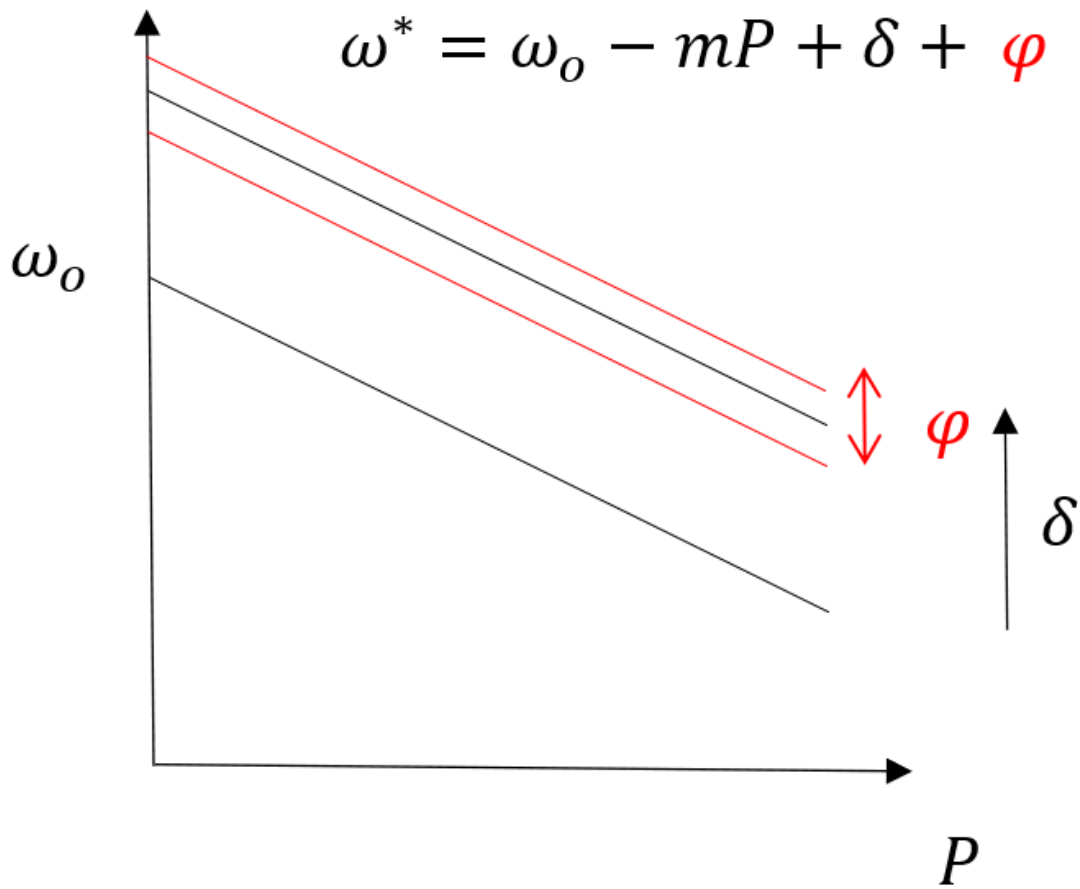


Figura 11: Efecto de la propuesta de control 1 sobre la ecuación del droop

Se espera que el término φ modifique a la ecuación del Droop en función de la deriva de reloj de cada inversor, haciéndola así, subir o bajar en función de la desviación de los relojes locales.

4.3 PROPUESTA DE CONTROL 2: MODIFICACIÓN DE LA PENDIENTE M POR MEDIO DE UN LAZO DE POTENCIA

La segunda propuesta de control, al igual que la primera, busca modificar por medio del control primario las referencias de frecuencias locales. Para ello se propone la modificación de la pendiente m_i de cada inversor por medio del término φ_i . Haciendo ahora que la pendiente sea una variable en función del error en compartición de potencias y no una constante como suele serlo. Donde la nueva pendiente sería:

$$m_i = km_i \pm \varphi_i \quad \text{Ec. 17}$$

Donde km_i es la parte constante de la pendiente.

Para saber el signo del término φ_i se realizó el siguiente análisis, partiendo de resultados obtenidos en investigaciones anteriores [2], donde se puede concluir que

para derivas de reloj mayores a 0 se tendrá un incremento en la potencia del inversor.

Además, en el dominio global del tiempo y debido al control secundario, en estado estacionario se cumple que:

$$(d_i + 1)\omega_i^* = \omega_o \quad \text{Ec. 18}$$

Por lo que si la deriva de reloj es positiva la frecuencia local de referencia será menor a la frecuencia nominal.

Partiendo que en estado estacionario se debe cumplir la ecuación 18, y que un cambio en m_i tiene un efecto inversamente proporcional a la frecuencia de referencia, implica que si m_i es modificada, para que se cumpla la ecuación 18 el método de Droop afectará a la potencia de manera inversa a los cambios en m_i . Además, si se sabe que una deriva de reloj positiva implica un aumento en la potencia del inversor y viceversa, podemos decir que las derivas de reloj afectan de manera inversa al término φ_i .

Por lo tanto, para derivas de reloj positivas se desea que el inversor inyecte una menor potencia, por lo que el valor de m_i deberá de ser mayor. Y de manera contrario si las derivas de reloj son negativas para compensar el error en compartición de potencia el valor de m_i deberá ser menor. Para que esto se cumpla la ecuación 17 deberá expresarse de la siguiente manera.

$$m_i = km_i - \varphi_i \quad \text{Ec. 19}$$

Donde si sustituimos la ecuación 19 en la ecuación 6 obtenemos:

$$\omega_i^* = \omega_o - (km_i - \varphi_i) \times P_i + \delta_i \quad \text{Ec. 20}$$

Este control, a diferencia del control secundario que modifica la recta de la ecuación del Droop subiendo o bajándola, busca modificar el punto de trabajo de los inversores modificando todas las pendientes, haciendo que la ecuación del Droop se comporte tal y como se muestra en la figura 12.

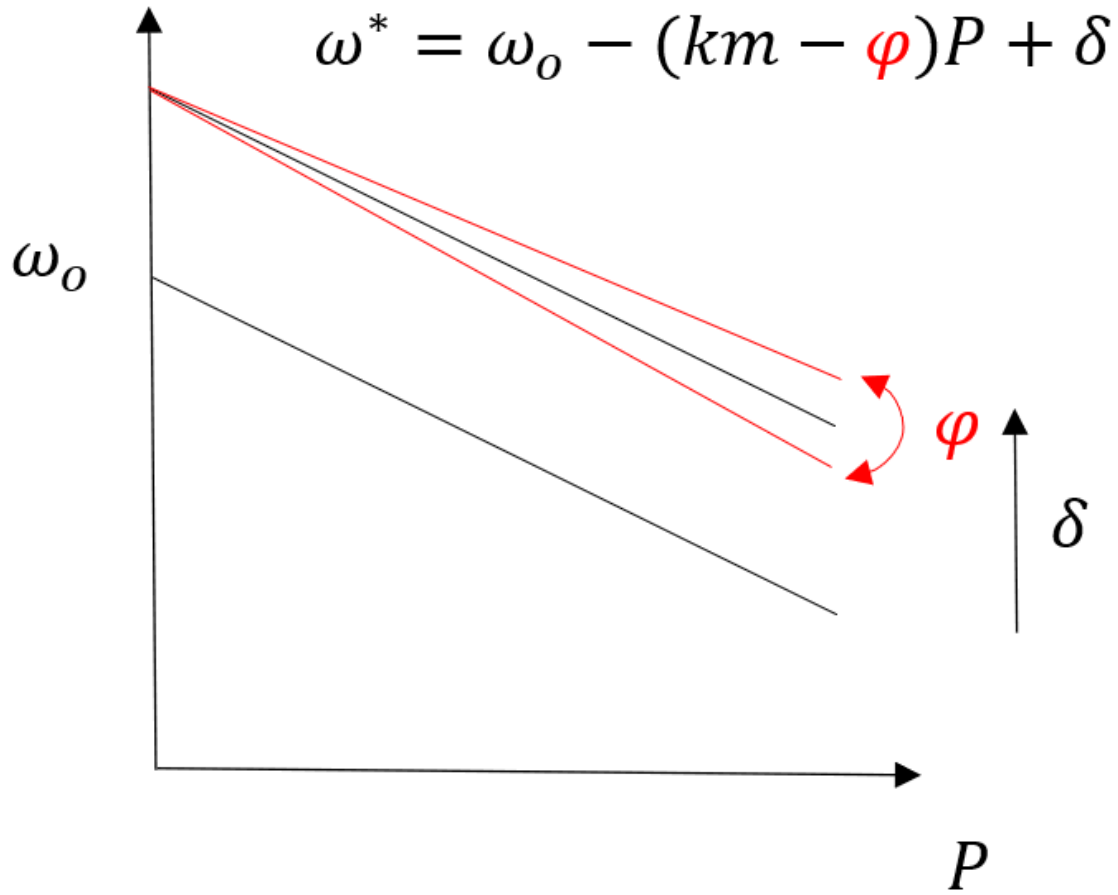


Figura 12: Efectos de la propuesta de control 2 sobre la ecuación del droop

Con esto el control logra modificar el punto de trabajo en función de las derivas de reloj por medio del término φ .

4.4 PROPUESTA DE CONTROL 3: MODIFICACIÓN DE LA REFERENCIA DE FRECUENCIA DEL CONTROL SECUNDARIO POR MEDIO DE UN LAZO DE POTENCIA

La tercera propuesta de control pretende hacer modificaciones al control secundario, agregando el término φ para modificar el lazo de frecuencias del control secundario, a diferencia de las dos anteriores que buscaban modificar el control primario. De esta manera esta propuesta tiene como objetivo atacar directamente el problema visto en la ecuación 12 ajustando el valor de ω_i para compensar las diferencias entre la frecuencia en tiempo local y la frecuencia en tiempo global. La nueva expresión del control secundario queda de la siguiente manera.

$$\delta_i = \omega_s \int (\alpha(\omega_o - \omega_i \times (1 \pm \varphi_i)) - \delta_i) dt \quad \text{Ec. 21}$$

La adición del término φ en el control secundario permitirá compensar el error en compartición de potencias sin necesidad de hacer modificaciones en el control primario. Haciendo que el término φ_i sea no lineal con respecto a ω_i .

Para saber el signo del término φ_i se partió de que en estado estacionario se debe cumplir que.

$$\omega_{i,es} = \omega_o(d_i + 1) \quad \text{Ec. 22}$$

Donde agregando el nuevo término de control obtenemos:

$$\omega_{i,es}(1 \pm \varphi_i) = \omega_o(d_i + 1) \quad \text{Ec. 23}$$

Dado se busca que en estado estacionario se cumpla que ω_o sea igual ω_i podemos expresar el término φ_i en función de d_i como

$$\pm \varphi_i = d_i \quad \text{Ec. 24}$$

Para que esto se cumpla, debido a que para derivas de reloj positivas el termino φ_i es negativo y viceversa, el signo del control deberá ser negativo, sino este será inestable. Expresando así la ecuación 21 de la siguiente manera

$$\delta_i = \omega_s \int (\alpha(\omega_o - \omega_i \times (1 - \varphi_i)) - \delta_i) dt \quad \text{Ec. 25}$$

Además, partir de la ecuación 24 tenemos un parámetro para asignarle un valor a la constante K_{pot} de la ecuación 14.

5. SIMULACIÓN Y RESULTADOS

En este capítulo se mostrarán los resultados de las simulaciones realizadas de la microrred. Estas simulaciones se realizaron con “MATLAB-SIMULINK”, en el cual se modeló los inversores y cargas del sistema. Para la simulación de los microcontroladores se hizo uso de la herramienta “trueTime” la cual es un simulador basado en MATLAB-SIMULINK para sistemas de control en tiempo real. Dando facilidades para la simulación de tareas de control ejecutada en microcontroladores en tiempo real, redes de comunicación y plantas dinámicas trabajando en tiempo continuo [10]. Entre las características de simulación TrueTime incluye [10]:

- Simulación de los tiempos del controlador debido al código de ejecución, programación de tareas y redes de comunicación.
- Posibilidad de escribir las tareas con funciones M-files o C++; o con bloques de Simulink
- Simulación de dispositivos con batería, escalas dinámicas de voltaje y relojes locales.

El modelo de la microrred simulada es el mostrado en la figura 13. Donde tal como se puede observar es una microrred que consta con 4 inversores en paralelo alimentando a una misma carga. Cada inversor trabaja de manera independiente como fuente de voltaje, y contando con su propio microcontrolador y con cargas de línea propia. La configuración de la microrred y las cargas a la cual fue sometida se muestran en la Tabla 1.

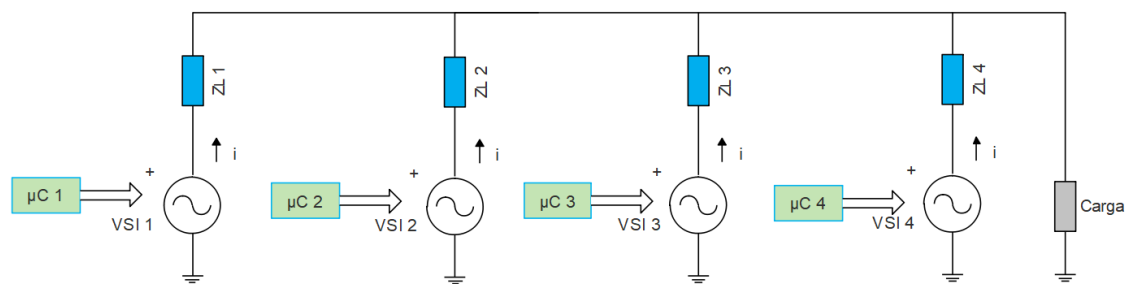


Figura 13: Modelo de la microrred simulada

Para el control de los inversores se hizo uso del control primario por el método de Droop, además se implementó un control secundario DLPF. Los parámetros de control, tanto del control primario, de las impedancias virtuales y de control secundario, se muestran en la tabla 2.

Tabla 1: Parámetros de la microrred modelada

Símbolo	Descripción	Valor nominal
N	Número de inversores	4
ZL1	Carga de línea 1	0,46 Ω , 40,71°
ZL2	Carga de línea 2	0,37 Ω , 37,75°
ZL3	Carga de línea 3	0,48 Ω , 34,31°
ZL4	Carga de línea 4	0,45 Ω , 43,8°
R_i	Carga Resistiva Inicial	0,21 Ω
R_f	Carga Resistiva final	0,45 Ω
f	Frecuencia nominal	60 Hz
Vo	Voltaje nominal	110 Vrms

Tabla 2: Constantes del control primario y secundario

Símbolo	Descripción	Valor nominal
m	Pendiente Droop	$1 \times 10^{-5} \text{ rad}/(\text{W s})$
ω_s	Frecuencia de corte DLPF	$20\pi \text{ rad/s}$
α	Ganancia DLPF	40 W^{-1}
Zo	Impedancia virtual	$4,83 \times 10^{-3} \Omega$, 90°

La simulación se realiza con tiempo continuo utilizando el método de ODE45 con una tolerancia relativa de 0.001 tal como se muestra en la figura 14. El tiempo total de simulación es de 30 segundos.

The image shows a simulation configuration window with the following sections and settings:

- Simulation time:** Start time: 0.0, Stop time: tstop
- Solver options:**
 - Type: Variable-step
 - Solver: ode45 (Dormand-Prince)
 - Max step size: auto
 - Relative tolerance: 1e-3
 - Min step size: auto
 - Absolute tolerance: auto
 - Initial step size: auto
 - Shape preservation: Disable All
 - Number of consecutive min steps: 1000
- Tasking and sample time options:**
 - Tasking mode for periodic sample times: SingleTasking
 - ☐ Automatically handle rate transition for data transfer
 - ☐ Higher priority value indicates higher task priority
- Zero-crossing options:**
 - Zero-crossing control: Use local settings
 - Algorithm: Nonadaptive
 - Time tolerance: 10*128*eps
 - Signal threshold: auto
 - Number of consecutive zero crossings: 1000

Figura 14: Configuración de la simulación

Los microcontroladores simulados tienen incorporado el código del control de los inversores, el cual se ejecuta de manera cíclica con un periodo de ejecución de 100 microsegundos. Las comunicaciones para el control propuesto en la ecuación 14 se ejecutan cada 1 milisegundo.

En total se llevaron a cabo 5 casos de simulaciones, las cuales serán presentadas en este trabajo. Estas son la simulación de la microrred sin derivas de reloj, simulación de los efectos de las derivas de reloj en la microrred y la simulación para cada una de las propuestas de control para corregir los efectos de las derivas del reloj.

Adicional en las simulaciones realizadas se hizo una prueba para ver si los controles eran robustos a perturbaciones en la carga, esta prueba consistía en realizar un cambio de carga al segundo 20 de la simulación.

Para la simulación de las derivas de reloj se configuró cada uno de los microcontroladores con diferentes derivas, estas se muestran en la tabla 3, solo para el caso de la primera simulación se consideró que las derivas de cada microcontrolador eran 0. En la tabla 3 ppm significa partes por millón.

Tabla 3: Derivas de reloj de los micro controladores

Símbolo	Descripción	Valor nominal
d_1	Deriva de reloj μC 1	80 ppm
d_2	Deriva de reloj μC 2	20 ppm
d_3	Deriva de reloj μC 3	0
d_4	Deriva de reloj μC 4	-80 ppm

Los resultados que se mostrarán de las simulaciones serán las gráficas de frecuencia y potencia en función del tiempo de cada uno de los inversores y los errores en frecuencias y de compartición de potencia, a excepción de la propuesta de control 2 en la cual también se muestra la evolución de la pendiente m_i del control primario.

Para el cálculo de los errores en frecuencia y compartición de potencias se utilizaron las siguientes expresiones:

$$e_{f,i} = \frac{\omega_i - \omega_o}{2\pi} \quad \text{Ec. 26}$$

$$e_{P,i} = 100 \times \frac{P_i - P_{prom}}{P_{prom}} \quad \text{Ec. 27}$$

$$P_{prom} = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N P_j \quad \text{Ec. 28}$$

Para las simulaciones de las propuestas de control se utilizaron los valores de K_{pot} mostrados en la tabla 4.

Tabla 4: Valores de Kpot

Símbolo	Descripción	Valor nominal
Kp_1	Propuesta de control 1	$7,5 \times 10^{-6}$
Kp_2	Propuesta de control 2	5×10^{-11}
Kp_3	Propuesta de control 3	5×10^{-11}

5.1 SIMULACIÓN DE LA MICRORRED SIN LAS DERIVAS DE RELOJ

En las figuras 15 y 16 se muestra la evolución de las frecuencias y potencias de los 4 inversores, como se puede notar sin derivas de reloj se cumple el objetivo de control del control primario de compartición de potencia.

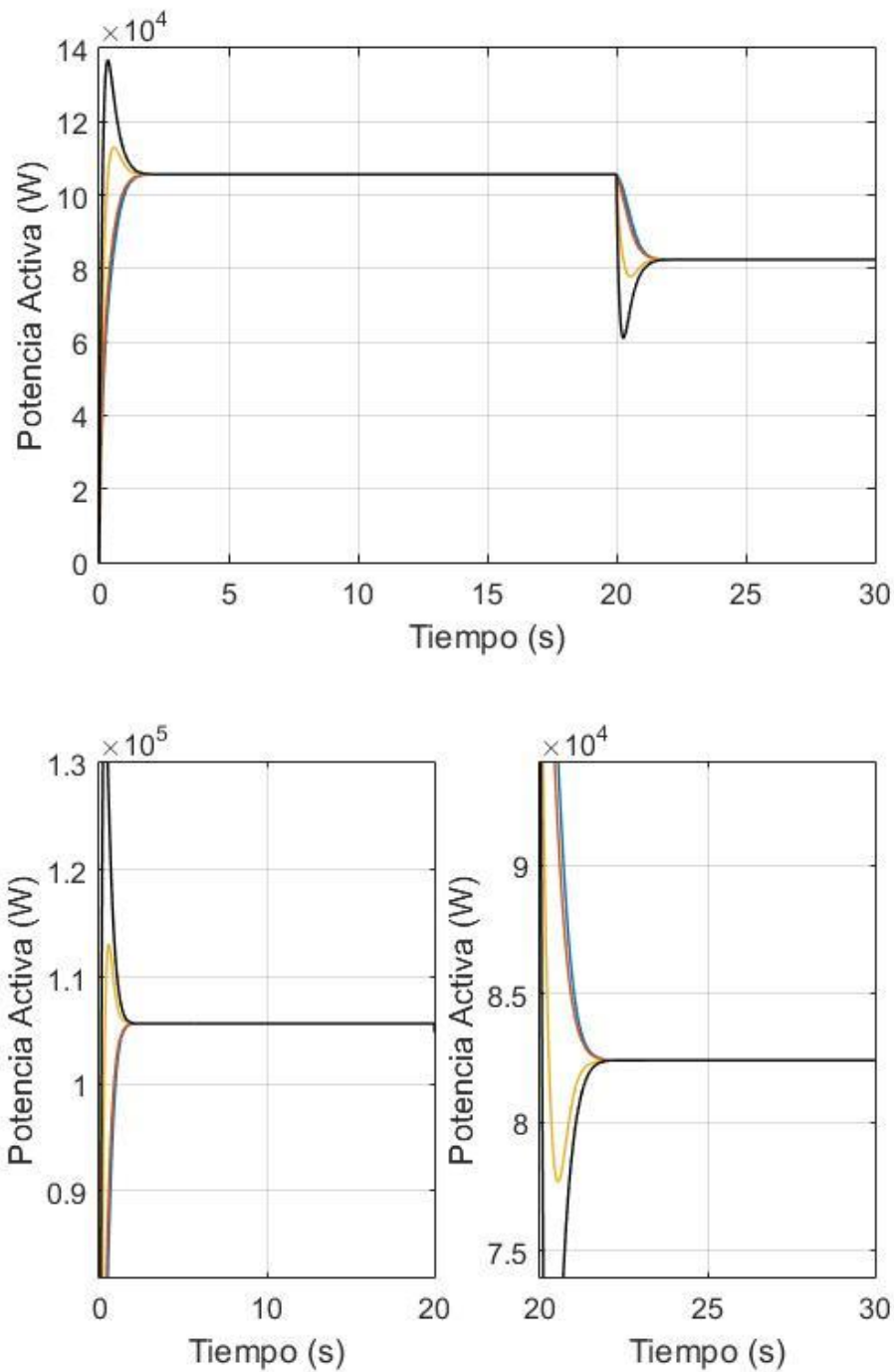


Figura 15: Gráfica de potencias sin derivas de reloj

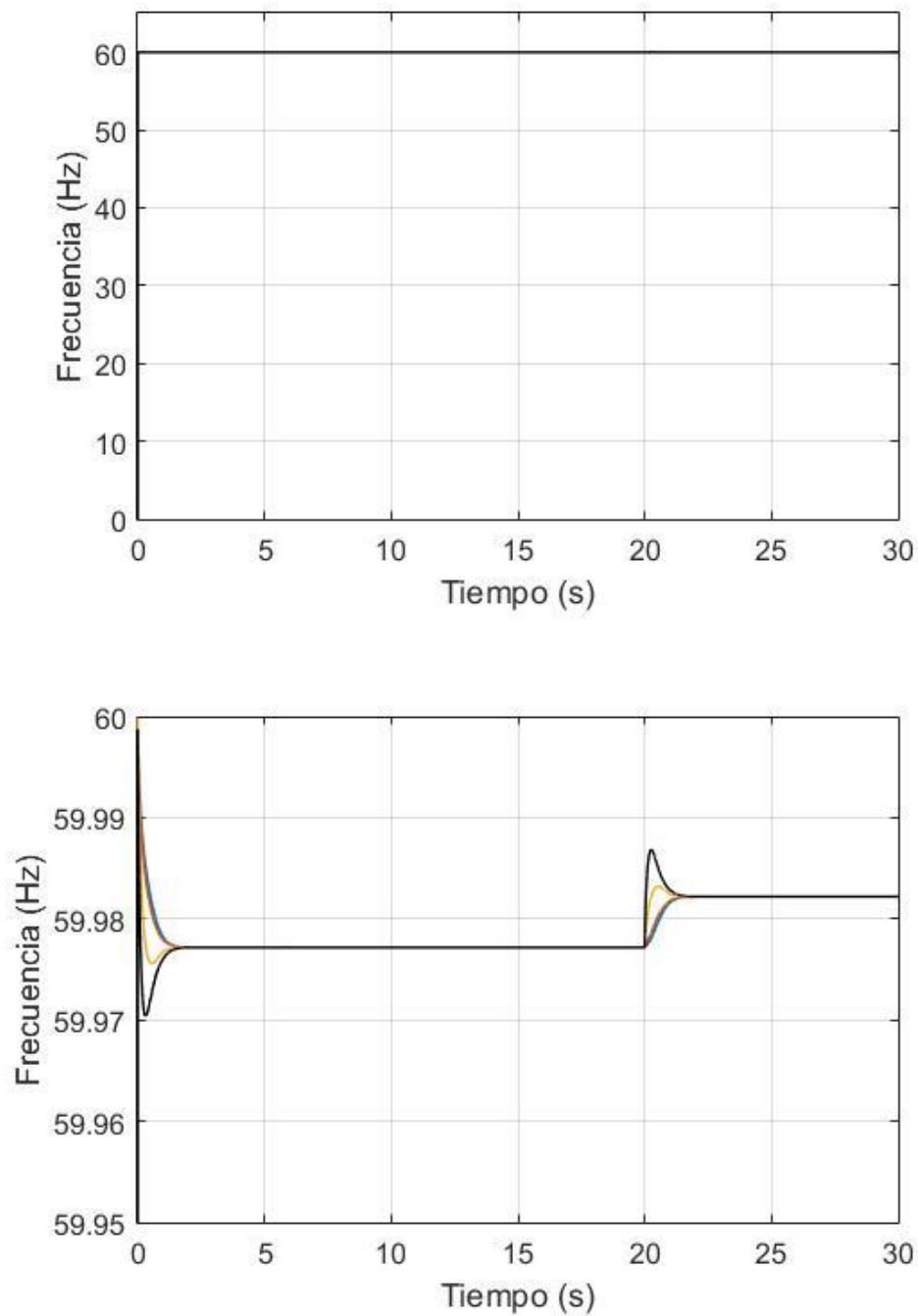


Figura 16: Gráficas de frecuencias sin derivas de reloj

En la figura 17 se muestran las gráficas de los errores en compartición de potencia de cada uno de los inversores.

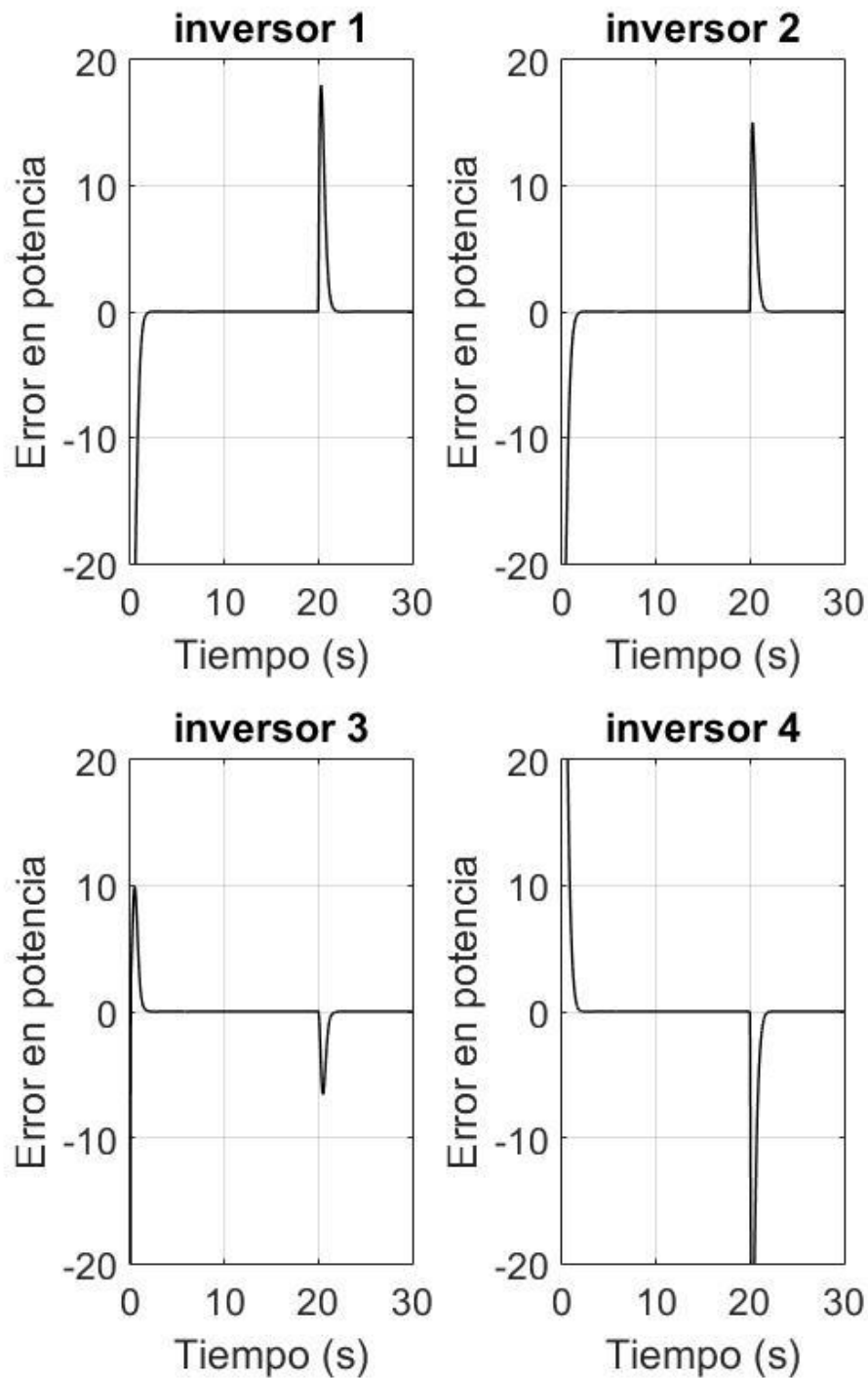


Figura 17: Error en compartición de potencia sin derivas de reloj

En la figura 18 se muestran las gráficas de los errores en frecuencia de cada uno de los inversores.

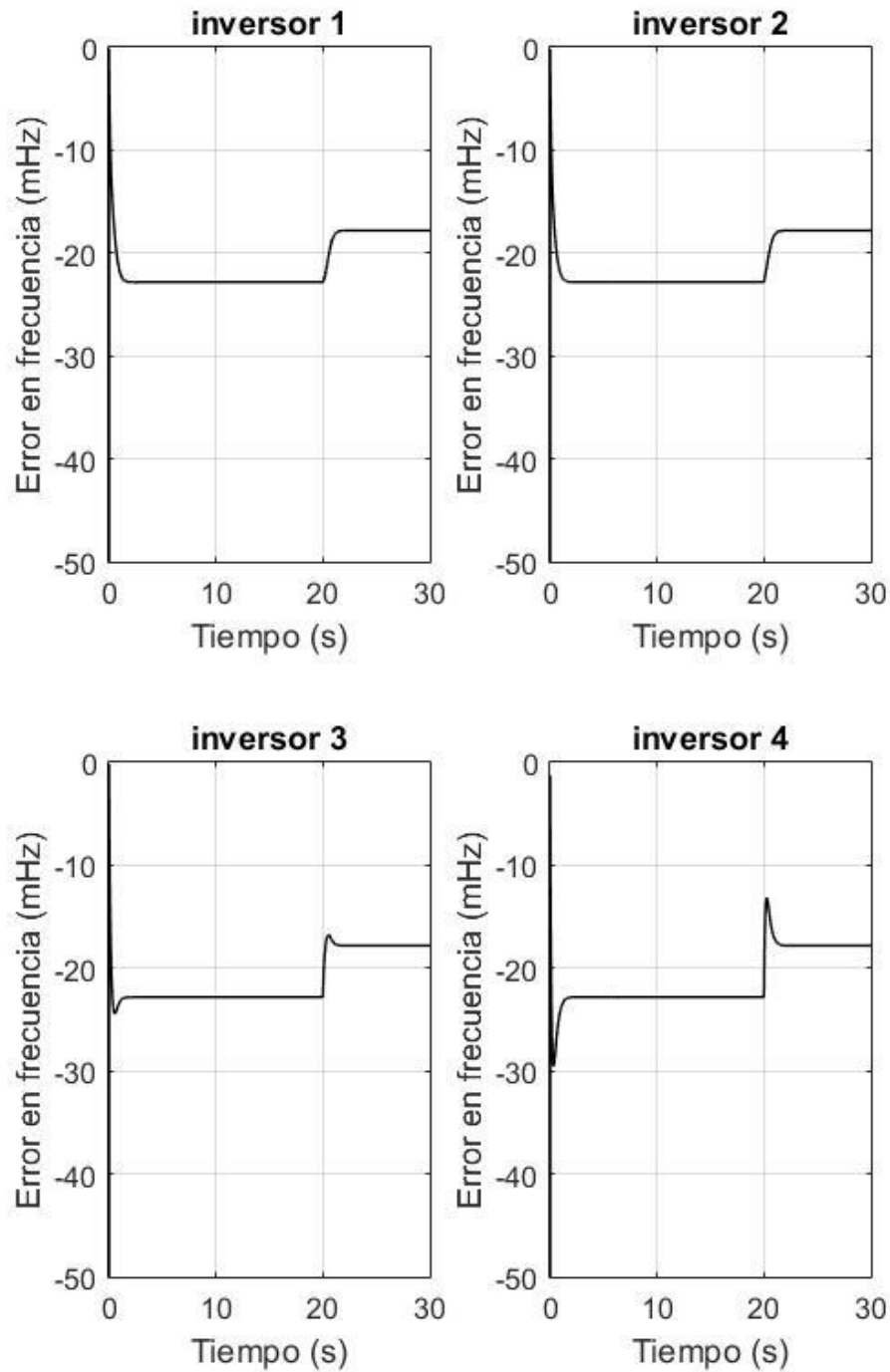


Figura 18: Error en frecuencia sin derivas de reloj

5.2 SIMULACIÓN DE LOS EFECTOS DE LAS DERIVAS DE RELOJ

En las figuras 19 y 20 se muestra la evolución de las frecuencias y potencias de los 4 inversores, como se puede notar a causa de las derivas de reloj no se logra cumplir el objetivo de compartición de potencia.

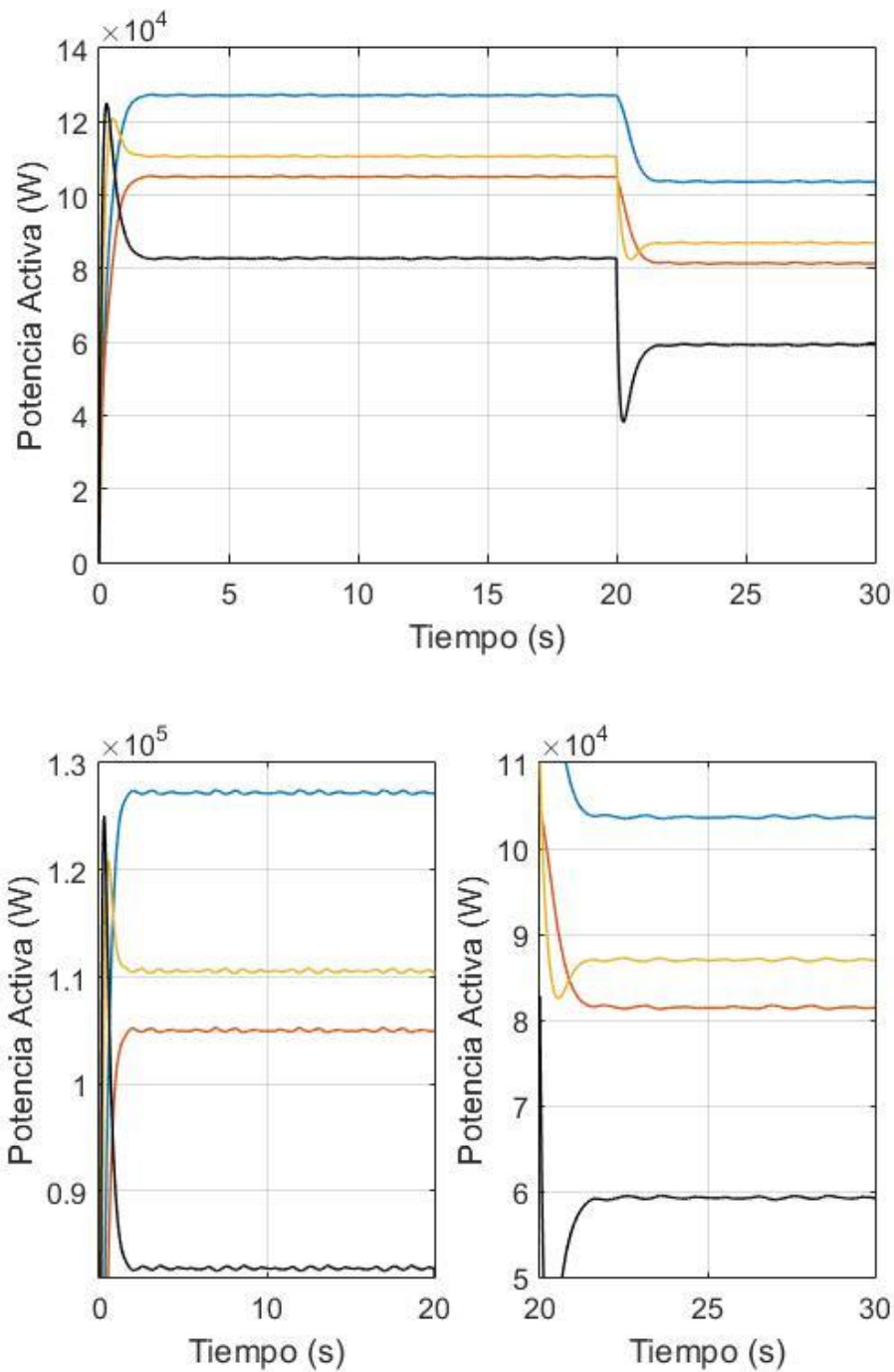


Figura 19: Gráfica de potencias con derivas de reloj

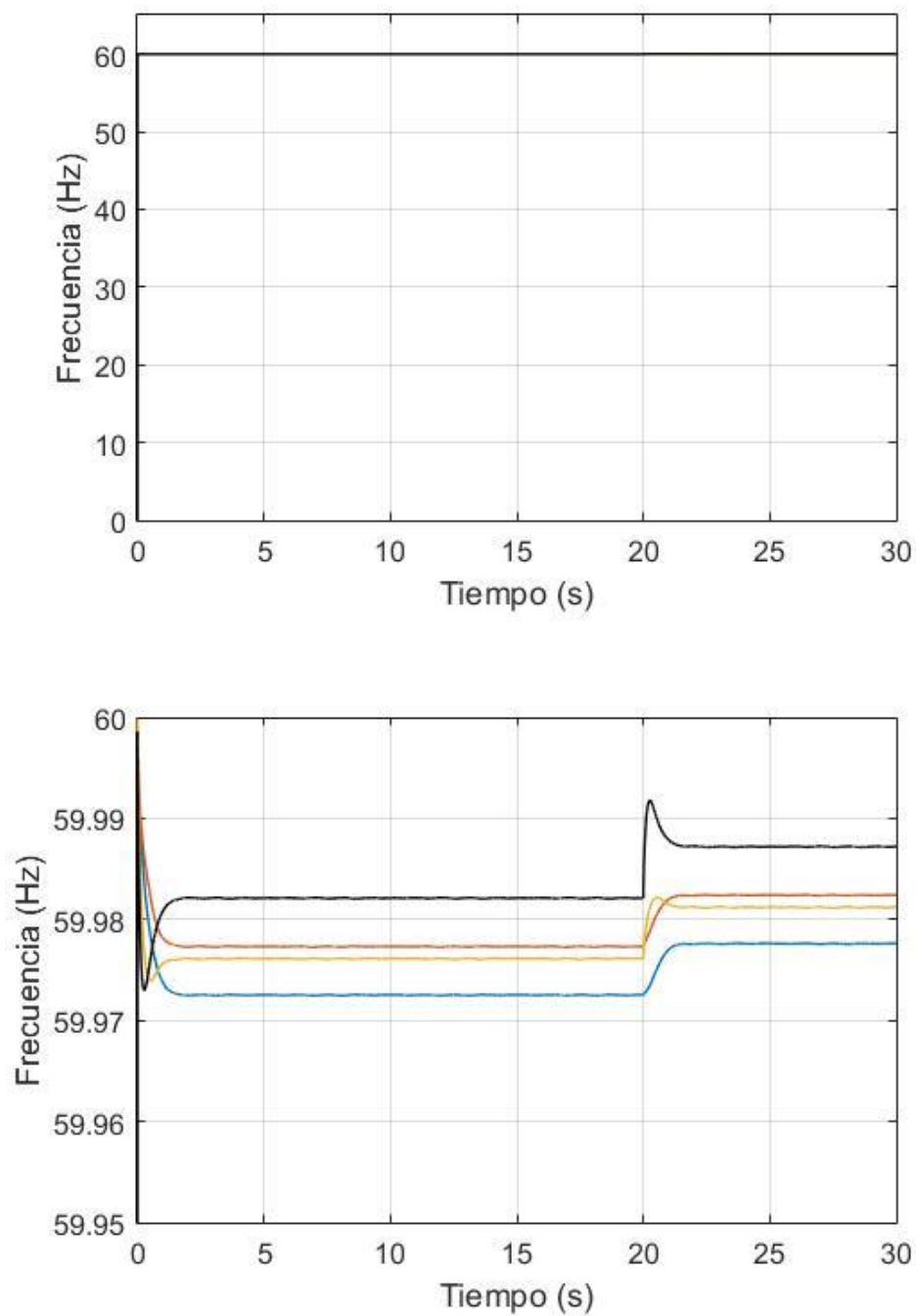


Figura 20: Gráficas de frecuencias con derivas reloj

En la figura 21 se muestran las gráficas de los errores en compartición de potencia de cada uno de los inversores.

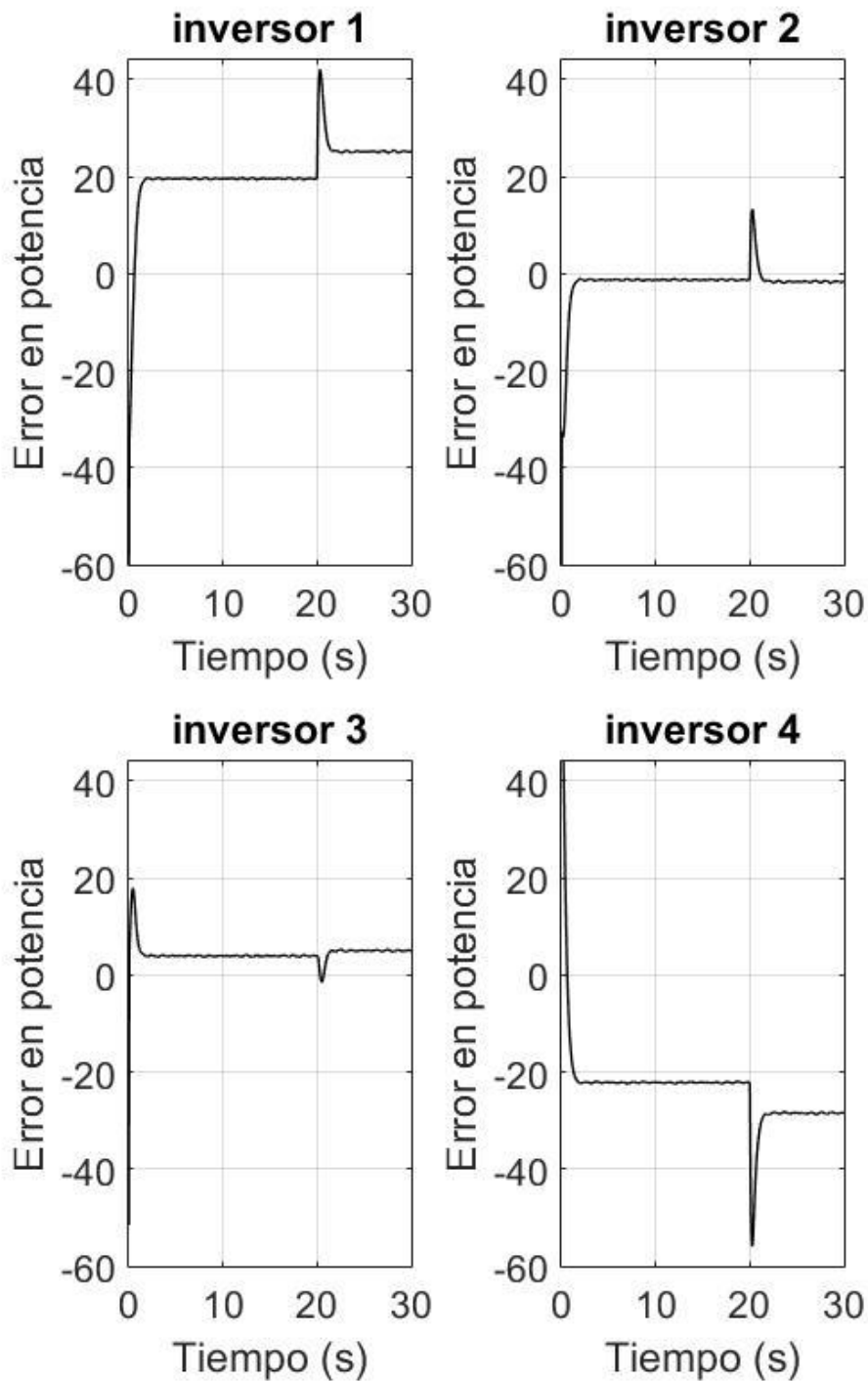


Figura 21: Error en compartición de potencias con derivas de reloj

En la figura 22 se muestran las gráficas de los errores en frecuencia de cada uno de los inversores.

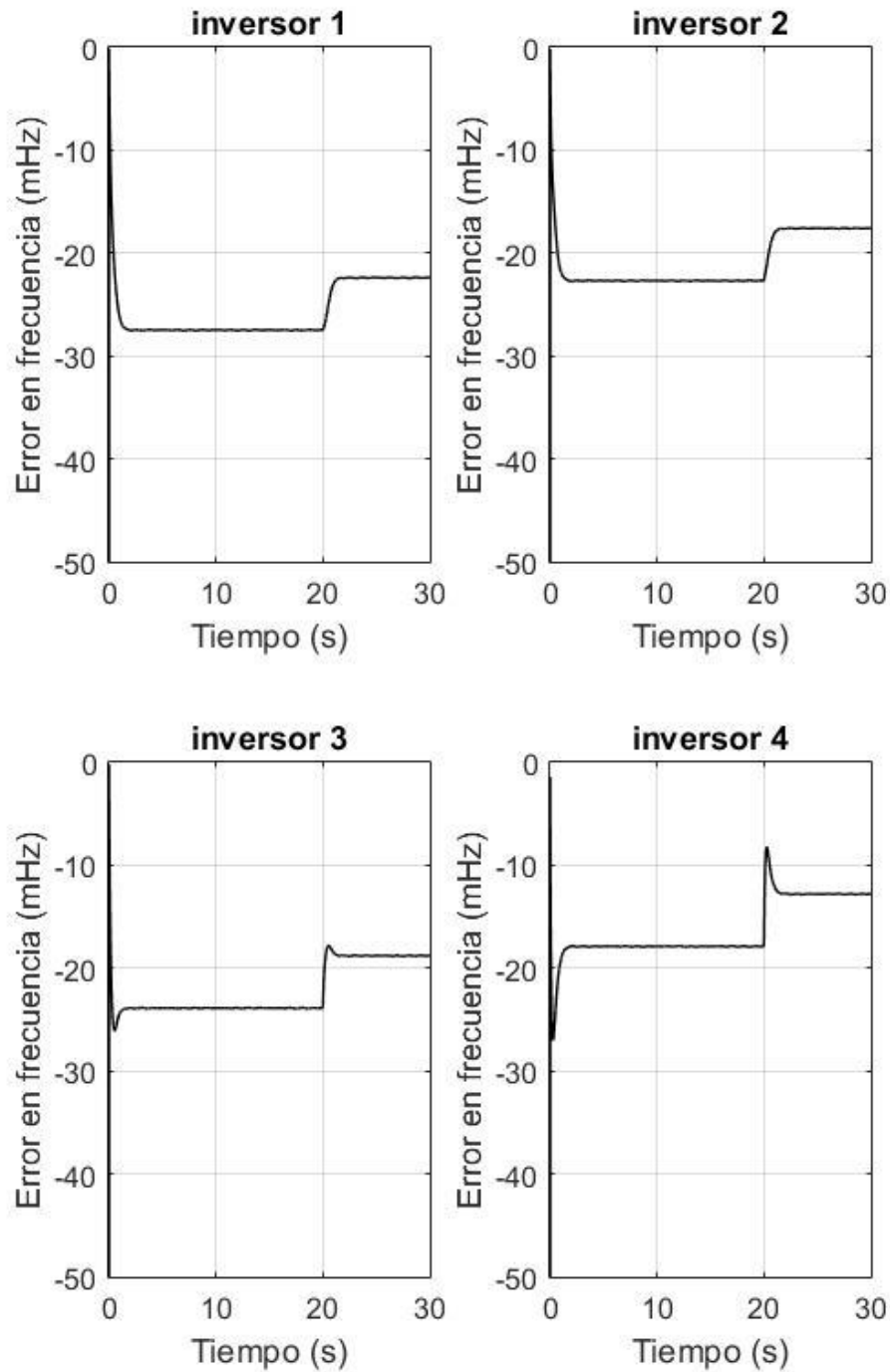


Figura 22: Error en frecuencias con derivas de reloj

5.3 SIMULACIÓN DE LA PROPUESTA DE CONTROL 1

En las figuras 23 y 24 se muestra la evolución de las frecuencias y potencias de los 4 inversores, como se puede notar a causa de las derivas de reloj no se logra cumplir el objetivo de compartición de potencia hasta el segundo 5 donde el control empieza a actuar.

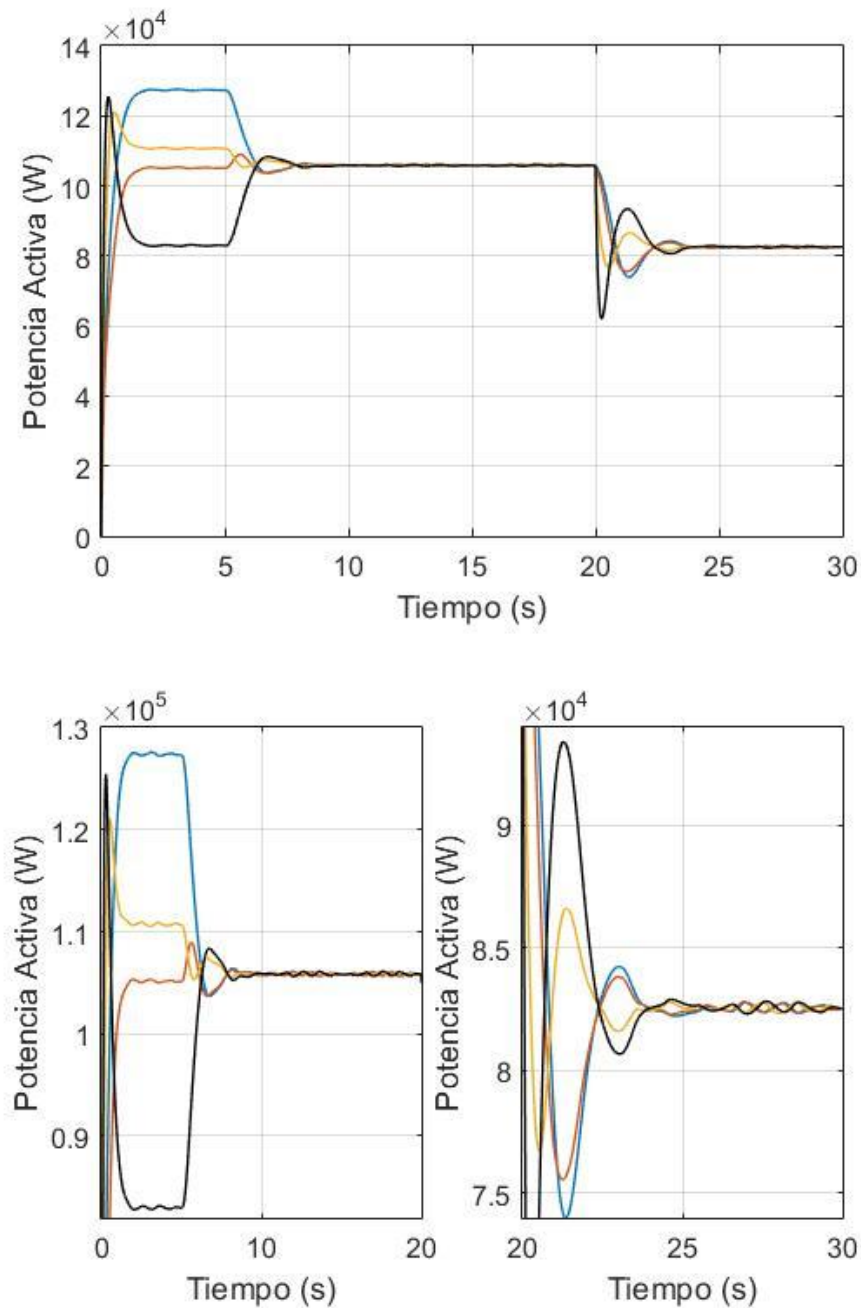


Figura 23: Gráficas de potencias de la propuesta 1

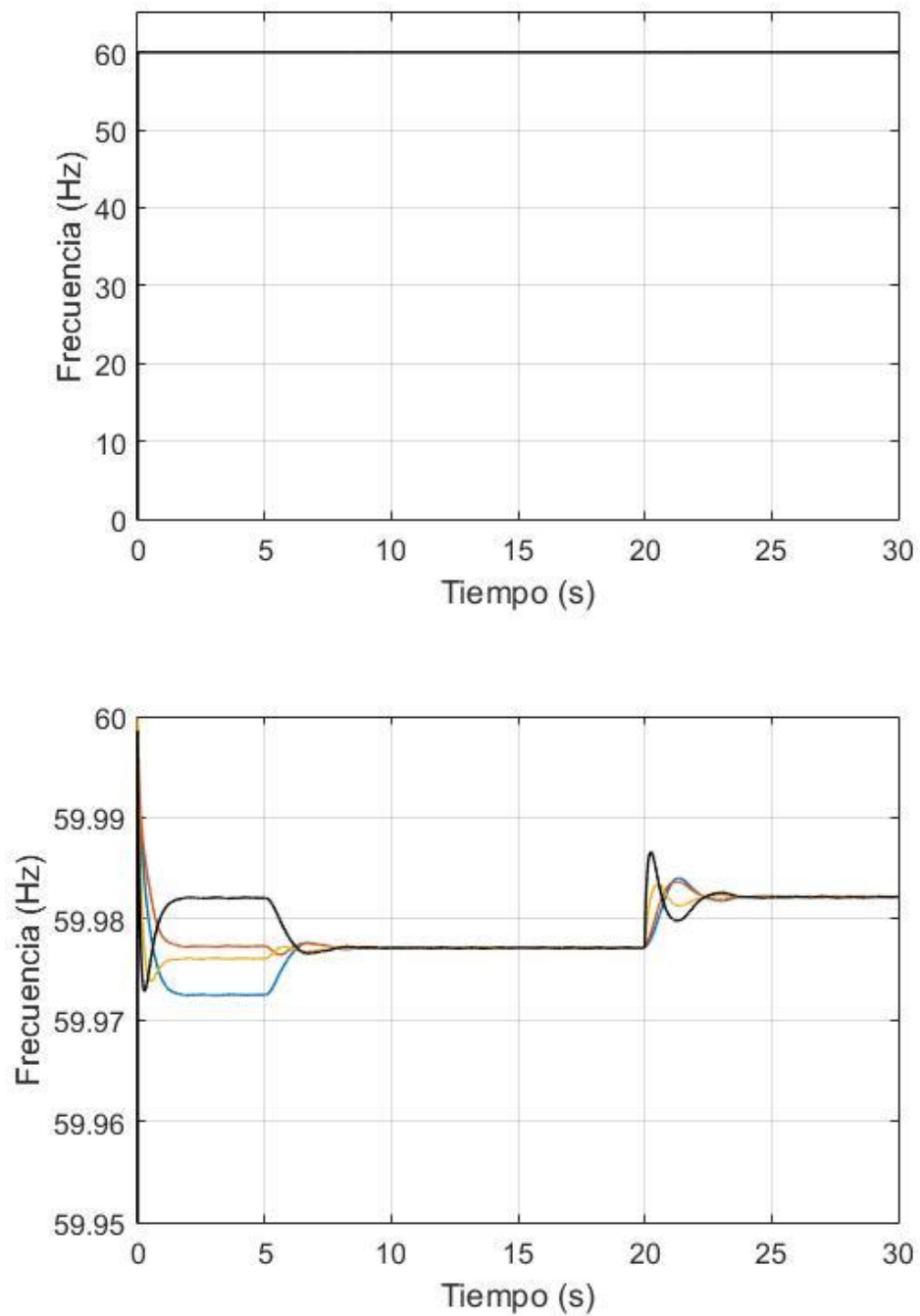


Figura 24: Gráfica de frecuencias de la propuesta 1

En la figura 25 se muestran las gráficas de los errores en compartición de potencia de cada uno de los inversores.

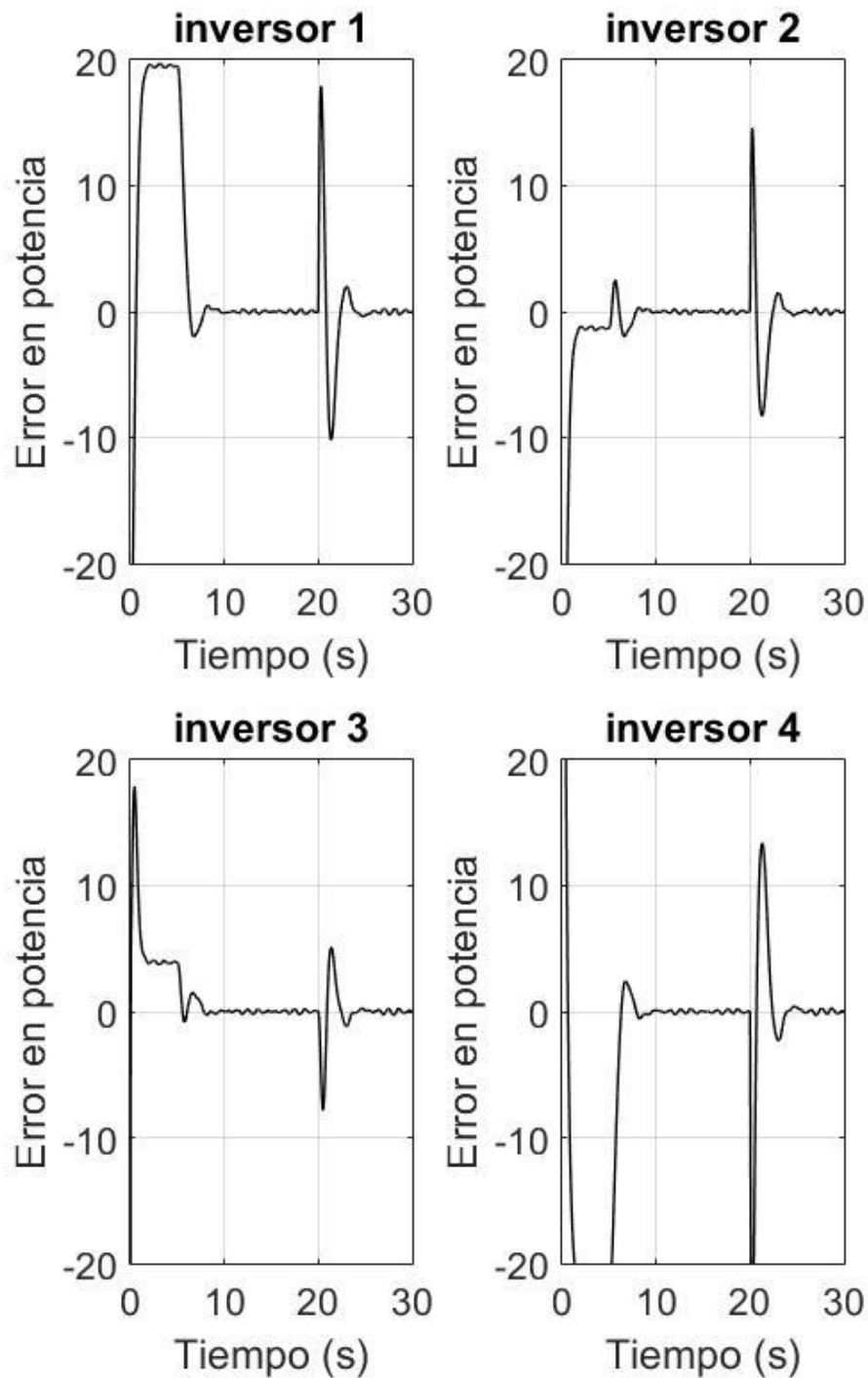


Figura 25: Error en compartición de potencias de la propuesta 1

En la figura 26 se muestran las gráficas de los errores en frecuencia de cada uno de los inversores.

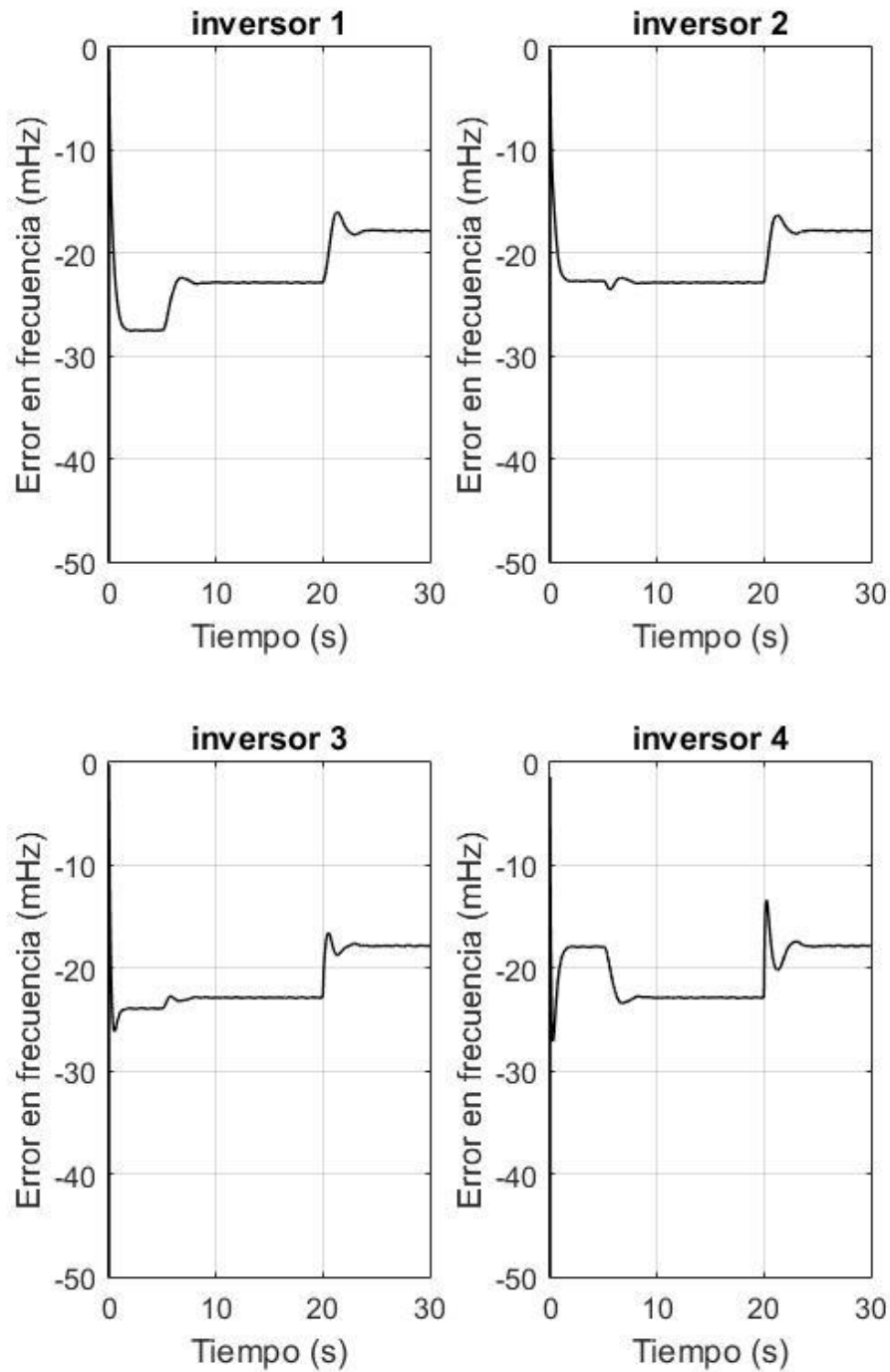


Figura 26: Error en frecuencia de la propuesta 1

5.4 SIMULACIÓN DE LA PROPUESTA DE CONTROL 2

En las figuras 27 y 28 se muestra la evolución de las frecuencias y potencias de los 4 inversores, como se puede notar a causa de las derivas de reloj no se logra cumplir el objetivo de compartición de potencia hasta el segundo 5 donde el control empieza a actuar.

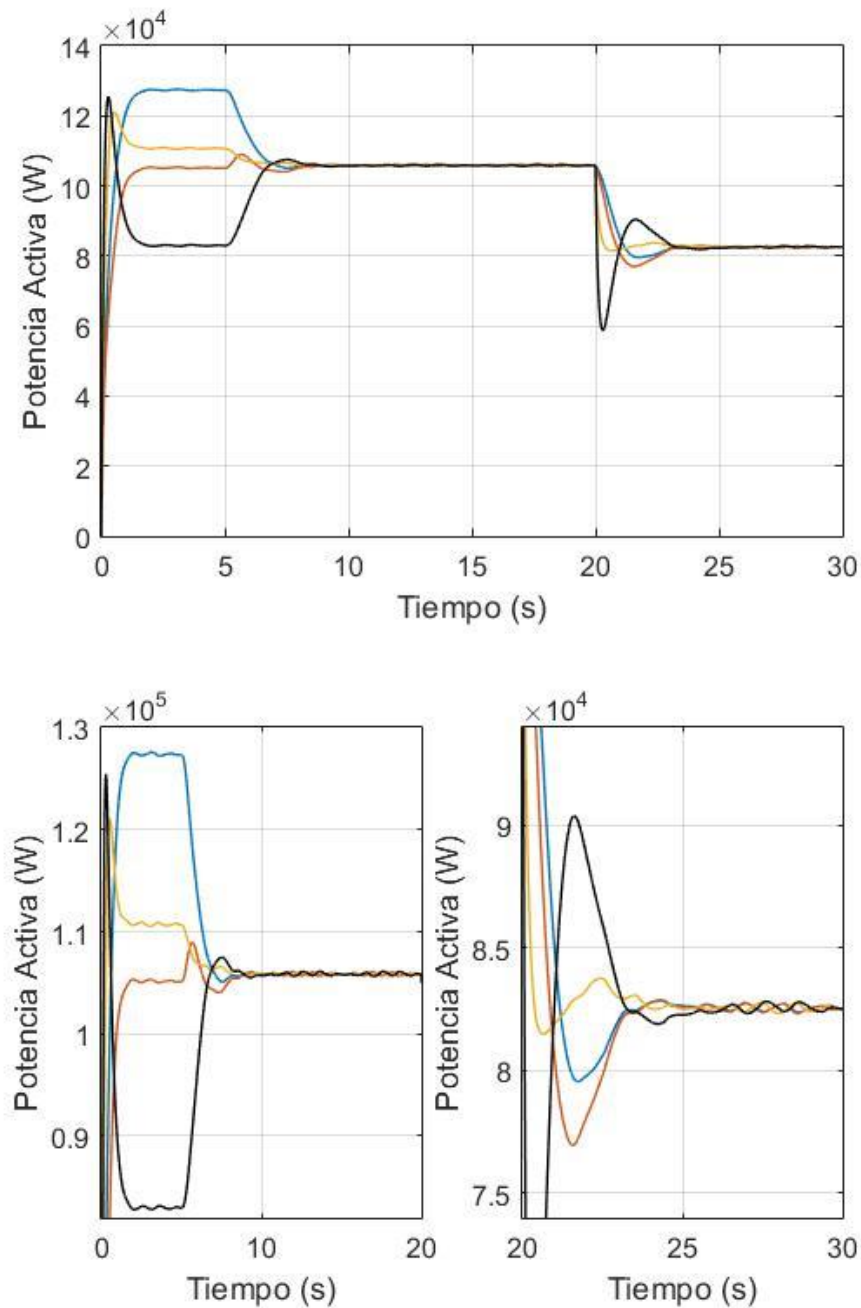


Figura 27: Gráfica de potencias de la propuesta 2

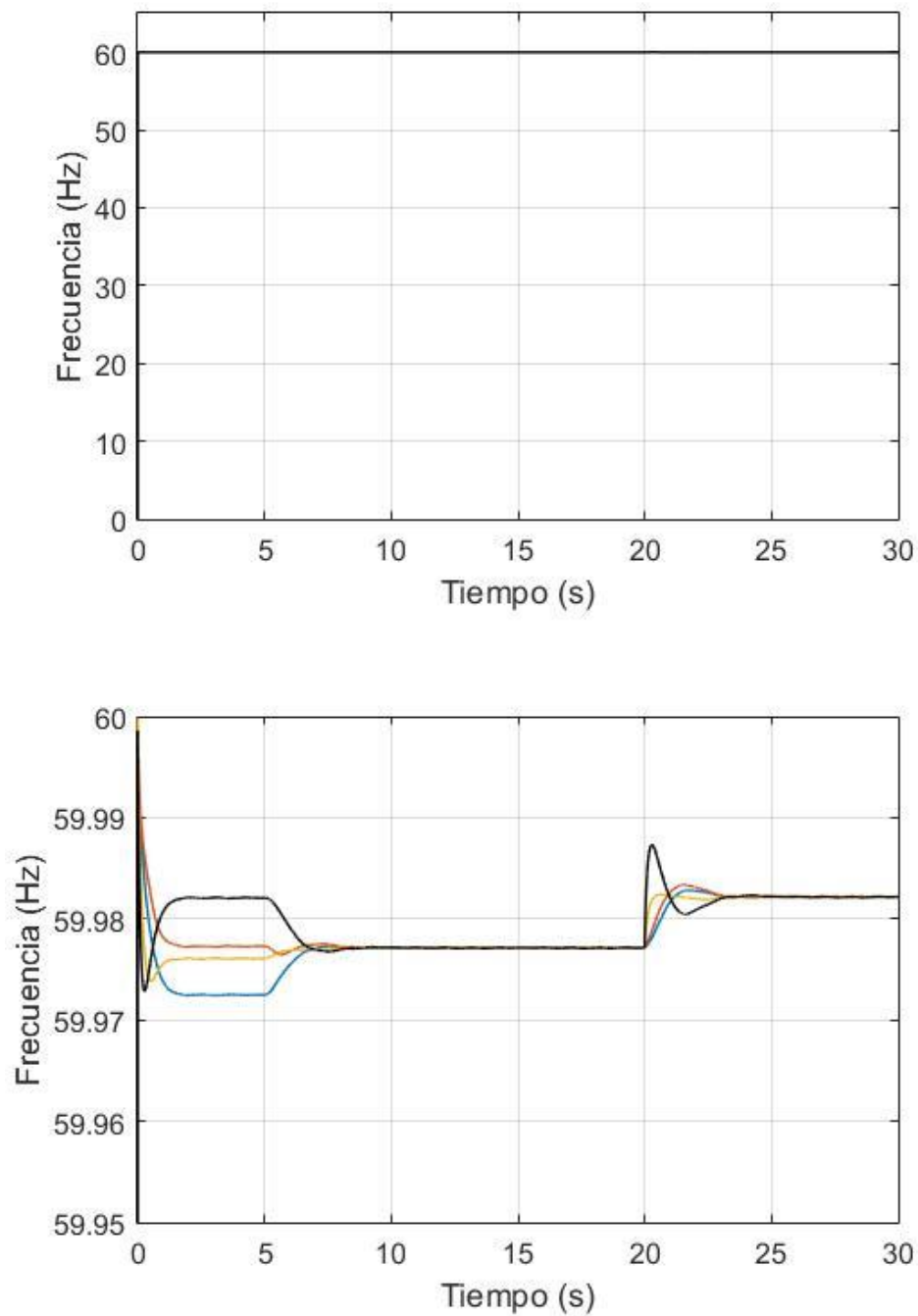


Figura 28: Gráfica de frecuencias de la propuesta 2

En la figura 29 se muestran las gráficas de los errores en compartición de potencia de cada uno de los inversores.

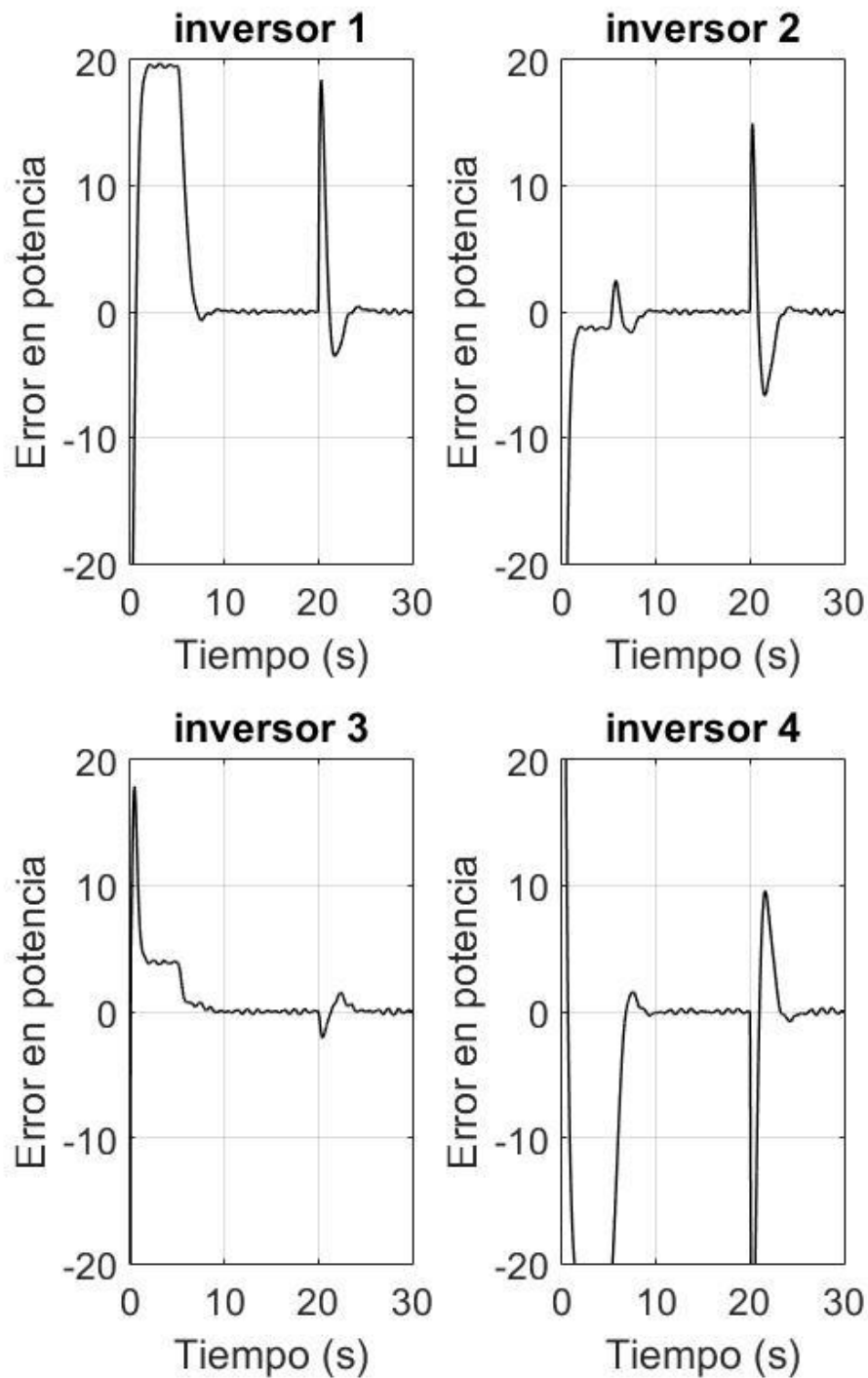


Figura 29: Error en compartición de potencia de la propuesta 2

En la figura 30 se muestran las gráficas de los errores en frecuencia de cada uno de los inversores.

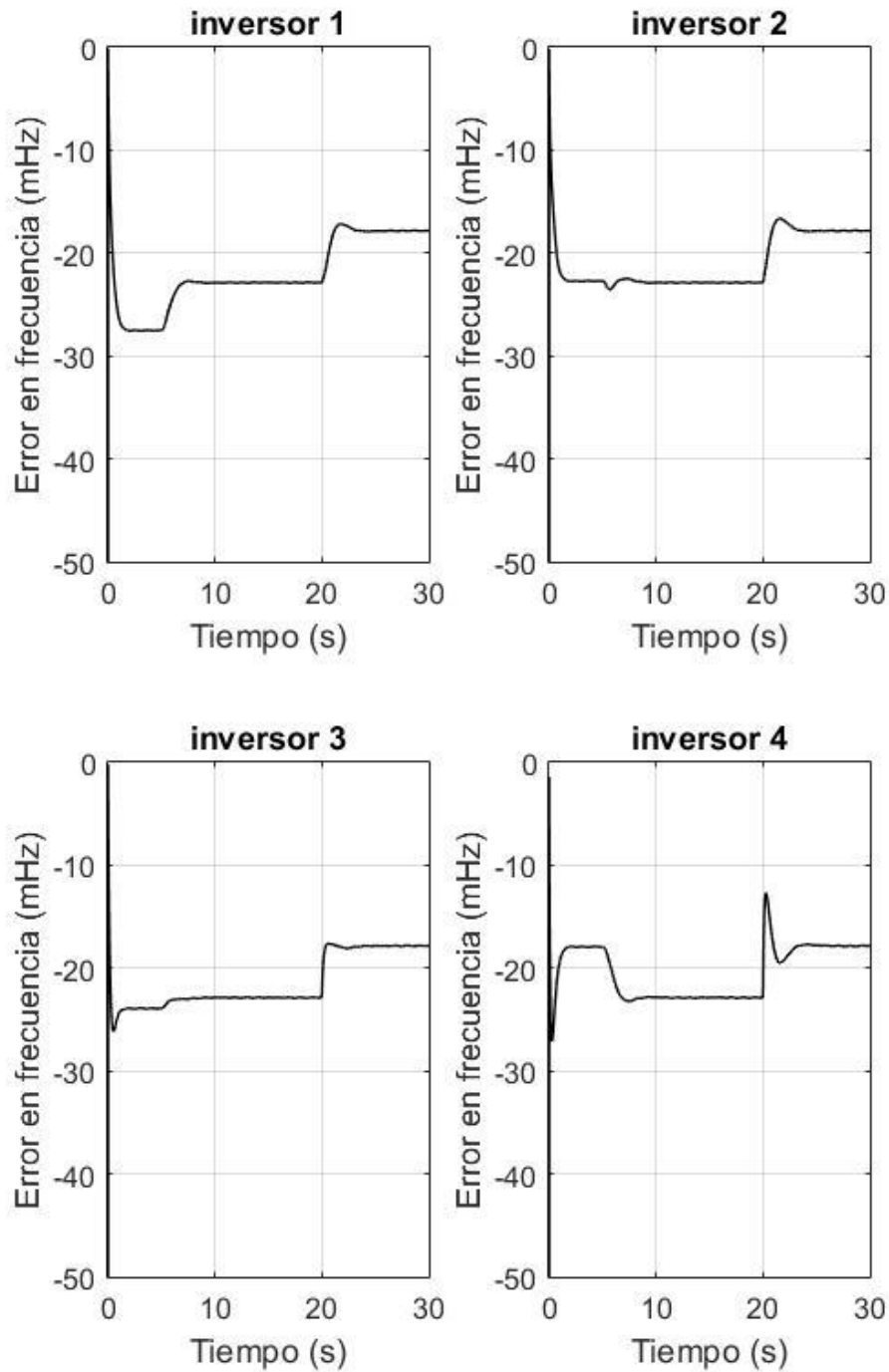


Figura 30: Error en frecuencia de la propuesta 2

5.5 SIMULACIÓN DE LA PROPUESTA DE CONTROL 3

En las figuras 31 y 32 se muestra la evolución de las frecuencias y potencias de los 4 inversores, como se puede notar a causa de las derivas de reloj no se logra cumplir el objetivo de compartición de potencia hasta el segundo 5 donde el control empieza a actuar.

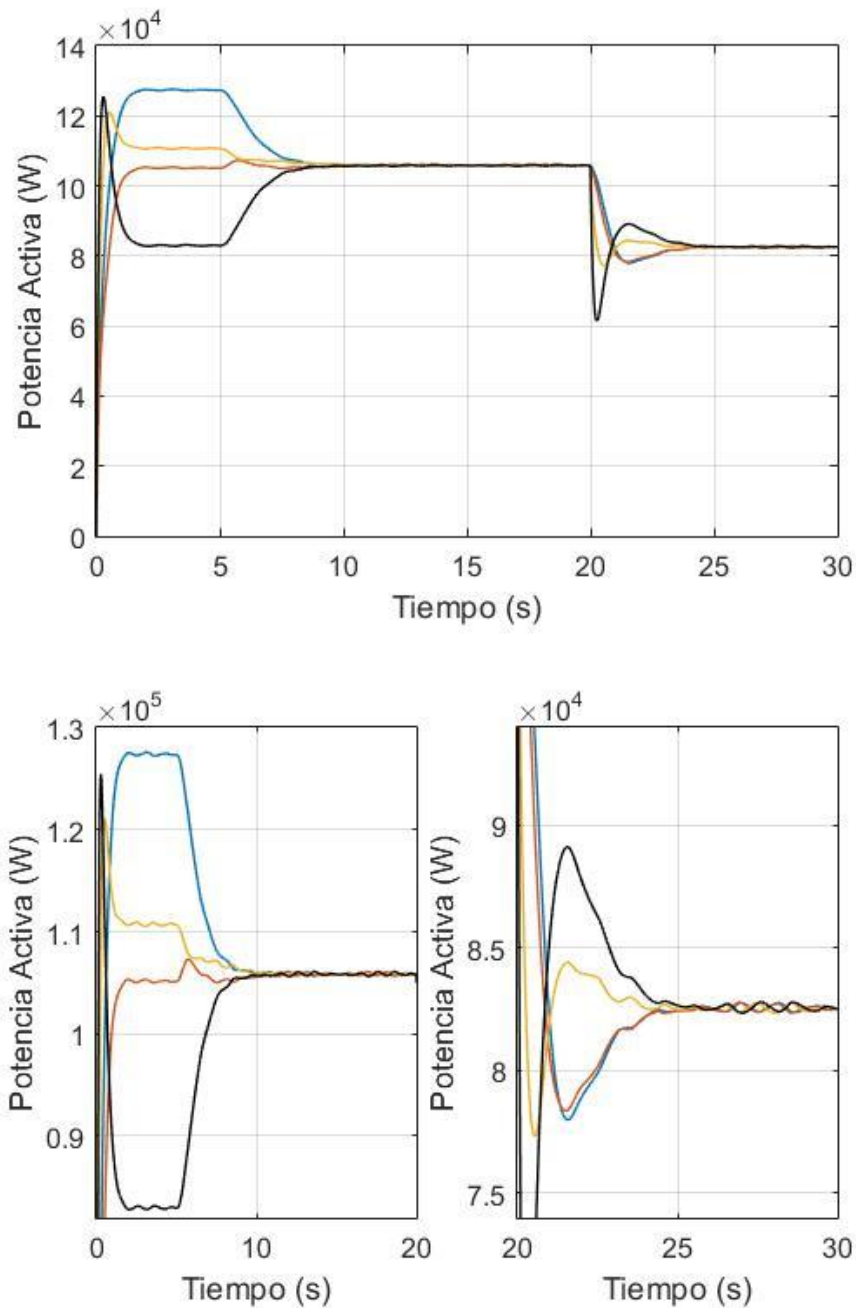


Figura 31: Gráfica de potencias de la propuesta 3

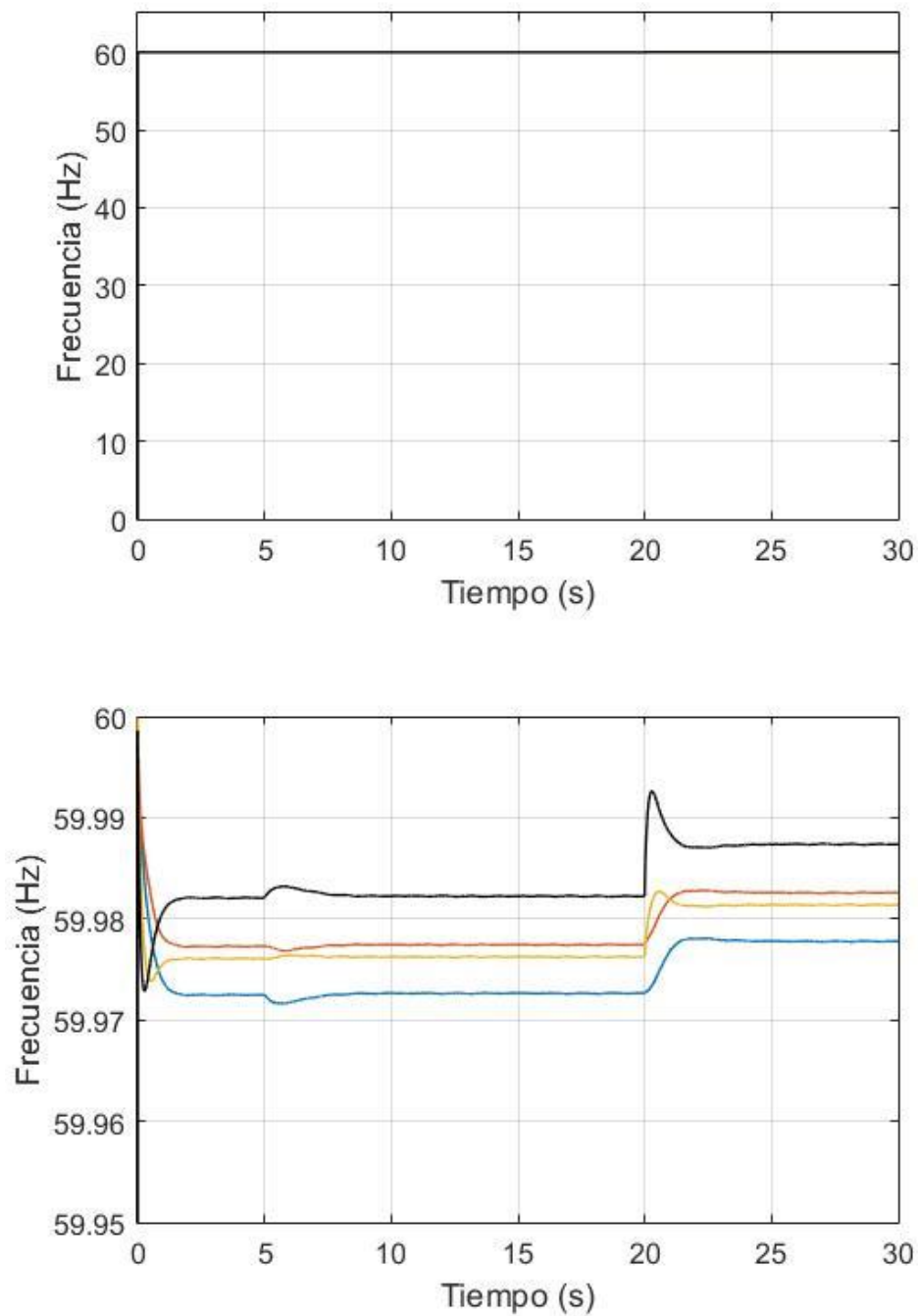


Figura 32: Gráfica de frecuencias de la propuesta 3

En la figura 33 se muestran las gráficas de los errores en compartición de potencia de cada uno de los inversores.

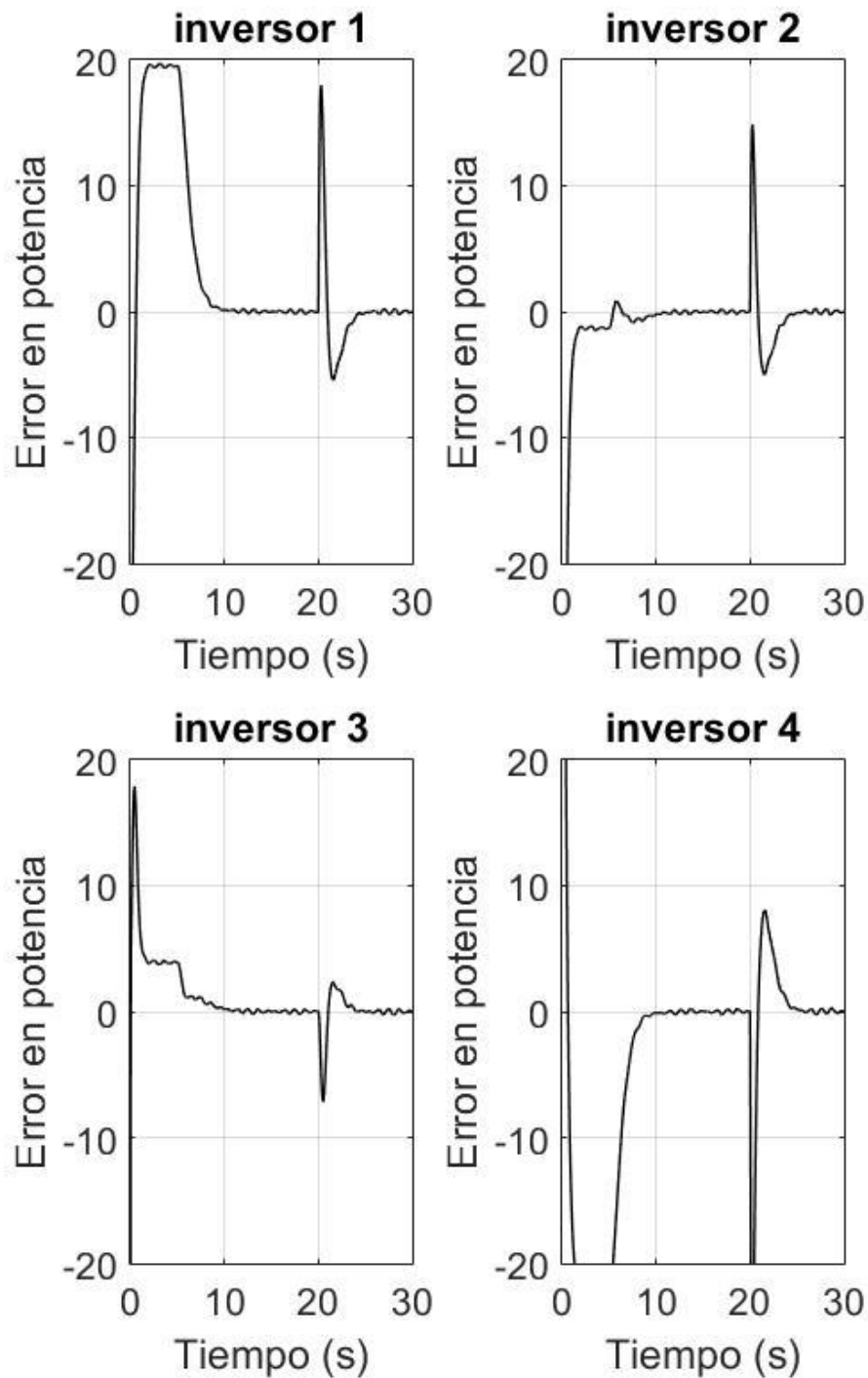


Figura 33: Error en compartición de potencia de la propuesta 3

En la figura 34 se muestran las gráficas de los errores en frecuencia de cada uno de los inversores.

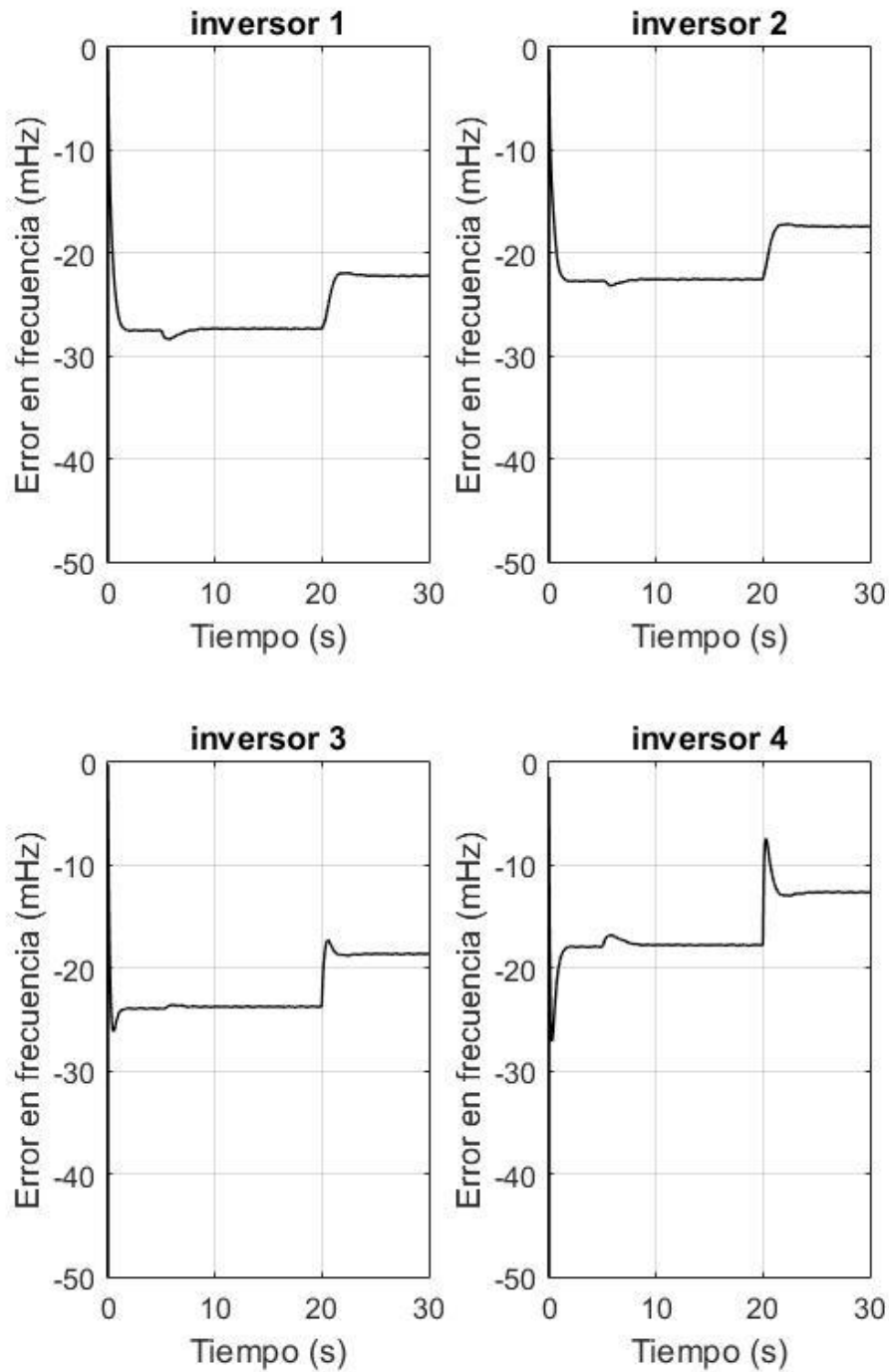


Figura 34: Error en frecuencia de la propuesta 3

5.6 ANÁLISIS DE RESULTADOS

A partir de los resultados de simulación podemos observar como las tres propuestas de control cumplen con su objetivo de corregir el error en compartición de potencia debido a los efectos de las derivas de tiempo. Estos efectos se pueden ver claramente en la figura 19, logrando en estado estacionario un porcentaje de error en potencia de aproximadamente 0%. Además, se aprecia que las propuestas de control no afectan el objetivo del control secundario, manteniendo los errores de frecuencia menores a 30 mHz en todos los casos, los cuales cumplen con normativas de calidad.

También se puede apreciar que se genera un poco de ruido en la potencia, lo cual es normal debido a la integral del lazo de control del término φ , pero esto no generaría ningún problema, ya que este no sobrepasa el 0.2% de porcentaje de error en potencia, además en implementación real debido a la misma dinámica de los inversores se genera ruido de mayor magnitud.

En cuanto a los resultados individuales de cada control podemos destacar la dinámica que aporta cada uno a las potencias al momento de ser activados, pudiéndose observar como la propuesta de control 1 aporta una respuesta más oscilatoria y lenta con respecto a los otros dos; siendo la propuesta de control 3 la que aporta una respuesta más amortiguada y rápida. En cuanto a las potencias es la propuesta 2 la que presenta el menor porcentaje de error.

Otro punto importante que destacar es la diferencia entre las frecuencias del control 1 y 2 con respecto al control 3, y esto es debido a que el tercer control no actúa directamente en la ecuación del Droop, por lo que no busca la compensación de las frecuencias locales de referencia con respecto de la global, usando el término φ para compensar directamente las derivas de tiempo presentes en la frecuencia local.

En la tabla 5 se presenta el resumen de resultados obtenidos en las simulaciones, con los tiempos de respuesta transitoria y el porcentaje de error de la compartición de potencias.

Tabla 5: Resumen de resultados

Control	Tiempo de respuesta transitoria	Error de potencia máximo en estado estacionario
Propuesta 1	5 segundos	0,20%
Propuesta 2	4,7 segundos	0,18%
Propuesta 3	4,5 segundos	0,20%

6. CONCLUSIONES

La principal contribución de este trabajo es la propuesta de tres métodos de control que permiten compensar los efectos de las derivas de reloj de los microcontroladores locales en las microrredes. Las propuestas modifican al control primario, dos de ellas, y al control secundario, una de ellas, agregando un nuevo término que incluye un lazo de error de potencias y un integrador de este lazo, el cual modifica las características de la ecuación del Droop para mejorar la dinámica de la microrred.

Estas propuestas de control fueron probadas en la simulación de una microrred de 4 VSI por medio de MATLAB-SIMULINK y TrueTime, obteniendo de ellas resultados favorables, donde se cumple el objetivo de control de compartición de potencias entre los inversores.

A partir de las simulaciones podemos concluir que la propuesta con mejor respuesta transitoria, justo después de activar los controles propuestos, es la propuesta de control 3, ya que de los resultados se observa una respuesta transitorio más rápida y sin oscilaciones. En cuanto a error en potencia es la propuesta 2 la que presentaba menor porcentaje de error en estado estacionario, aunque en muy poca cantidad, con respecto a las otras dos propuestas. Siendo la peor de ellas la primer propuesta de control, teniendo mayor oscilación en la respuesta transitoria y ligeramente más error en compartición de potencia en estado estacionario.

Como estudios futuros se propone la implementación de estos controles en una microrred física, para de esta manera poder validar los resultados de la simulación con resultados experimentales. También se propone la implementación de estas propuestas en otros esquemas de control secundario o primario.

BIBLIOGRAFIA

- [1] Ducoy, Javier Ramon. "Implantación de energías renovables en una planta de producción de amoníaco". Escuela Superior de Ingenieros de Sevilla, septiembre 2012.
- [2] M. Castilla, A. Camacho, P. Martí, M. Velasco, and M. MoradiGhahderijani, "Impact of clock drifts on communication-free secondary control schemes for inverter-based islanded microgrids," IEEE Trans. Ind. Electron., in Press.
- [3] Fraser, Peter. "Distributed generation in liberalised electricity market", IEA Publications, 2002
- [4] Hatziargyriou, Nikos. "Microgrids: Large Scale Integration of Micro-Generation to Low Voltage Grids", National Technical University of Athens, 2006
- [5] T. S. Basso and R. DeBlasio, "IEEE 1547 series of standards: interconnection issues," in IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 19, no. 5, pp. 1159-1162, Sept. 2004.
- [6] "DOE Microgrid Workshop Report", Department Of Energy United States of America, Agosto 2011.
- [7] J. A. P. Lopes, C. L. Moreira and A. G. Madureira, "Defining control strategies for MicroGrids islanded operation," in IEEE Transactions on Power Systems, vol. 21, no. 2, pp. 916-924, May 2006.
- [8] F. Katiraei, R. Iravani, N. Hatziargyriou and A. Dimeas, "Microgrids management," in IEEE Power and Energy Magazine, vol. 6, no. 3, pp. 54-65, May-June 2008.
- [9] J. C. Vasquez, J. M. Guerrero, J. Miret, M. Castilla and L. Garcia de Vicuna, "Hierarchical Control of Intelligent Microgrids," in IEEE Industrial Electronics Magazine, vol. 4, no. 4, pp. 23-29, Dec. 2010.
- [10] Anton Cervin, Dan Henriksson, Bo Lincoln, Johan Eker, Karl-Erik Årzén: "How Does Control Timing Affect Performance? Analysis and Simulation of Timing Using Jitterbug and TrueTime." IEEE Control Systems Magazine, 23:3, pp. 16–30, June 2003.